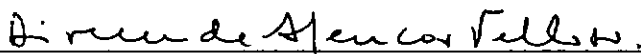


A SONDAGEM GAMA NA VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DE
ESTACAS ESCAVADAS

CLAUDIO LUIZ RESTA FRAGELLI

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

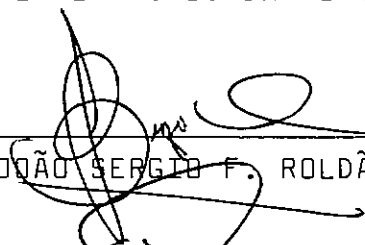
Aprovada por:



PROF. DIRCEU DE ALENCAR VELLOSO
(Presidente)



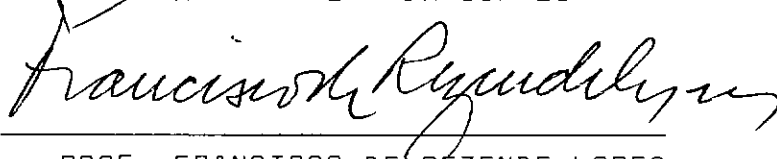
PROF. SERGIO A. B. DA FONTOURA



PROF. JOÃO SERGIO F. ROLDÃO



PROF. MARCIO MIRANDA SOARES



PROF. FRANCISCO DE REZENDE LOPES

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1985

FRAGELLI, CLAUDIO LUIZ RESTA

A Sondagem Gama na Verificação da Integridade de Estacas Escavadas(Rio de Janeiro) 1985.

XII, 280 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ , M.Sc., Engenharia Civil, 1985)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Sondagem Gama 2. Integridade de Estacas Escavadas I. COPPE / UFRJ II. Título (Série)

A meus pais

e

meus irmãos

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Dirceu de Alencar Velloso, pela orientação e apoio.
- Ao prof. João Sérgio F.Roldão, pela co-orientação na parte experimental e franquia do Laboratório de Traçadores da COPPE, onde foram realizados os ensaios da pesquisa.
- Aos professores Jacques de Medina, Maurício Ehrlich, Cláudio F. Mahler e Willy A.Lacerda, pela cessão de parte de suas verbas de pesquisa para a realização deste trabalho.
- Ao prof. Marcio Miranda Soares pela amizade, apoio e incentivo sempre recebidos.
- À professora Lídia C.Domingues, pela franquia do Laboratório de Concreto da COPPE para a moldagem dos c.p.'s.
- Aos estagiários da COPPE, Elízio Antunes Jardim e Sergio Fonseca Cândido, pela amizade e dedicação no auxílio da preparação e realização dos ensaios.
- Ao sr. Álvaro de Souza Braga, pelos trabalhos na Oficina Mecânica da COPPE.
- Ao prof. Ian Schumann M.Martins, pela amizade e constante incentivo.
- Ao desenhista Sebastião Gilmar Fernandes, pelo seu trabalho e apoio.
- À datilógrafa Maria Auxiliadora Andrade de Paula, pela datilografia do texto e incentivo.
- Aos meus tios Chrysantho e Beatriz Figueiredo, pelo apoio constante e carinho.
- Aos docentes do Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ, em especial da Área de Mecânica dos Solos, pelos conhecimentos recebidos, apoio e amizade ao longo de todo o curso.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

A SONDAGEM GAMA NA VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DE ESTACAS ESCAVADAS

CLAUDIO LUIZ RESTA FRAGELLI

MARÇO, 1985

Orientador: Dirceu de Alencar Velloso

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho faz-se inicialmente uma revisão bibliográfica algo detalhada sobre os métodos disponíveis de verificação da integridade de estacas, na intenção de que se possa compará-los entre si e, também, com a sondagem gama, estudada em teoria e ensaios na presente pesquisa.

Em seguida avalia-se, por meio de ensaios de laboratório, a sondagem gama para a verificação da integridade de estacas escavadas. Este método é estudado através de um protótipo de sonda nuclear à base de radiação gama, projetado e construído na COPPE/UFRJ para os fins desta pesquisa. São apresentados os ensaios de avaliação da área ensaiada pela sonda no concreto, ensaios de calibração, critério de otimização do aparelho e ensaios para verificar a sensibilidade do método a anomalias no concreto. Analisando o conjunto dos dados experimentais, conclui-se a respeito das possibilidades da sondagem gama como ensaio de verificação da integridade.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

THE GAMA LOGGING METHOD IN THE VERIFICATION OF THE
INTEGRITY OF BORED PILES

CLAUDIO LUIZ RESTA FRAGELLI

March, 1985

Chairman: Dirceu de Alencar Velloso

Department: Civil Engineering

This work begins by an extensive review of the bibliography on pile integrity tests of piles. Available methods are compared among themselves and, also, with the backscattering gamma logging, which is object of the present study.

In order to optimize the prototype probe, designed and built at COPPE-UFRJ, a series of different tests was carried out and the results were discussed in detail. In addition, the main changes found necessary to improve the prototype are also commented upon.

Finally, analysing all the experimental data, the possibilities of the gamma logging as a way of verifying the integrity of bored piles is discussed.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO: O PROBLEMA GERAL DOS ENSAIOS DE INTEGRIDADE. OBJETIVOS DA TESE	1
CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 - Os Métodos de Verificação da Integridade	9
2.2 - Métodos sem Preparação Prévia da estaca	11
2.2.1 - Escavação do Terreno	12
2.2.2 - Perfuração Vertical da Estaca	14
2.2.2.1-Perfuração por Sondagem Rotativa	14
2.2.2.2-Perfuração à Percussão Rotativa	16
2.2.3 - Sonda de Calibre	17
2.2.4 - Inspeção por Câmera de TV	19
2.2.5 - Ensaio Sísmico	21
2.2.6 - Ensaio Vibratório	27
2.2.7 - Ensaio de Impacto	36
2.3 - Métodos com Preparação Prévia da Estaca	37
2.3.1 - Ensaio Sísmico com Sensores Embutidos	37
2.3.2 - Compressão Integral do Fuste	40
2.3.3 - Sondagem Sônica	41
2.3.4 - Sondagem Gama por Redrodispersão	54
2.3.4.1-Introdução	54
2.3.4.2-Princípios Básicos do Método	55
2.3.4.3-Componentes da Sonda	59
2.3.4.3a - Introdução	59
2.3.4.3b - O Detetor	60
2.3.4.3c - A Blindagem. Colimadores	63

2.3.4.3d - A Fonte Radioativa	66
2.3.4.4-Tubos de Acesso	68
2.3.4.5-Utilização da Sonda	70
2.3.4.6-Causas de Erro no Método	74
2.3.4.6a - Introdução	74
2.3.4.6b - Mudança das Características do Tubo de Acesso	75
2.3.4.6c - Variação das Características Elétricas do Circuito de Contagem	77
2.3.4.6d - Falta de Uniformidade na Densidade do Meio	79
2.3.4.6e - Decaimento da Fonte Radioativa	84
2.3.4.6f - Flutuação Estatística da Taxa de Contagem	86
2.3.4.6g - Variação da Composição Química do Meio	87
2.3.4.7-Vantagens e Desvantagens da Sondagem Gama	101
CAPÍTULO III - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	104
3.1 - Princípios de Radioatividade	104
3.1.1 - Fundamentos	104
3.1.2 - Interação da Radiação Gama com a Matéria	107
3.1.3 - Lei Fundamental da Radioatividade	110
3.1.4 - Absorção de Radiação Gama pela Matéria	114
3.2 - O Raio de Influência da Sonda	116
3.3 - A Curva de Calibração	122

3.3.1 - Fatores Influenciando as Curvas de Resposta	125
3.3.2 - Equações para as Curvas de Resposta	129
3.4 - A Estatística da Radioatividade	133
3.5 - Flutuação Estatística da Taxa de Contagem	141
3.5.1 - Introdução	141
3.5.2 - O Desvio Padrão da Taxa de Contagem com Exatidão no Tempo de Observação	144
3.5.3 - A Influência do Tempo de Medida no Desvio Padrão da Taxa de Contagem	147
3.5.4 - O Desvio Padrão da Taxa de Contagem Medida sem Exatidão no Tempo de Observação	149
3.5.5 - Uma Estimativa para o Desvio Padrão do Tempo da Contagem	150
CAPÍTULO IV - A CONTRIBUIÇÃO DESTA PESQUISA	156
CAPÍTULO V - MATERIAIS E MÉTODOS	160
5.1 - O Sistema de Medição	160
5.2 - Cabos de Conexão	160
5.3 - Característica do Scaler	162
5.4 - Componentes da Sonda	162
5.4.1 - Introdução	163
5.4.2 - O Invólucro	163
5.4.3 - O Berço da Fonte	163
5.4.4 - A Fonte Radioativa	165
5.4.5 - A Blindagem	166
5.4.6 - O Detetor e seu Invólucro	168

5.4.7 - As Montagens da Sonda	170
5.5 - Os Corpos de Prova	170
5.5.1 - Dimensionamento dos C.P.'s	170
5.5.2 - Moldes para os C.P.'s	173
5.5.3 - Finalidades e Características dos C.P.'s	174
5.5.3.1-C.P.'s para a Determinação do Raio de In <u>fluência</u> da Sonda no Concreto Simples	174
5.5.3.2-C.P.'s para Obtenção da Curva de Calibra <u>ção</u>	176
5.5.3.3-C.P.'s para Estudo do Erro Causado pela Folga no Tubo de Acesso em Relação à Son <u>da</u>	177
5.5.3.4-C.P.'s para Avaliação da Sensibilidade da Sonda a vários Tipos de Defeito	177
5.5.3.5-C.P. para Avaliação do efeito da Arma <u>ção</u> da Estaca na Medida em Concreto ínte <u>gro</u>	178
5.5.4 - Procedimentos na Confecção dos C.P.'s	185
5.5.5 - Características dos Tubos de Acesso	187
5.6 - Determinação da Densidade dos Materiais	190
5.7 - O Ajuste das Curvas de Resposta pelo Método dos Mínimos Quadrados	197
5.8 - O Teste de Qui-Quadrado para as Contagens	199
5.9 - Aferição da Estabilidade do Sistema de Contagem	203
CAPÍTULO VI - RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÃO	209
6.1 - Introdução	209
6.2 - Determinação do Raio de Influência no Concreto	210

6.2.1 - Introdução	210
6.2.2 - Resultados	210
6.2.2.1-O Maior Raio de Influência no Concreto	210
6.2.2.2-O Raio de Influência no Concreto	212
6.2.3 - Discussão	213
6.2.3.1-Quanto ao Maior Raio de Influência no Concreto	213
6.2.3.2-Quanto ao Raio de Influência no Con - creto	214
6.2.3.3-Quanto aos Tubos de PVC e Aço	215
6.3 - Influência do Piso no "Background" da Sonda e nas Medidas em C.P.'s	222
6.3.1 - Influência do Piso no "Background" da Sonda	222
6.3.2 - Influência do Piso nas Medidas em C.P.'s	223
6.4 - A Medida do "Background" da Sonda e do Ambiente	230
6.4.1 - O "Background" da Sonda (BGS)	230
6.4.2 - O "Background" do Ambiente (BGA)	232
6.5 - Obtenção das Curvas de Resposta e da Curva de Calibração	237
6.5.1 - Introdução	237
6.5.2 - Resultados	238
6.5.2.1-As Curvas de Resposta	238
6.5.2.2-DOFD. A Curva de Calibração	240
6.5.2.3-O Ensaio dos C.P.'s de Água	241
6.5.3 - Discussão dos Resultados	242
6.5.3.1-Quanto às Curvas de Resposta	242

6.5.3.2-Quanto à DOFD e Curva de Calibração	243
6.6 - Efeito na Taxa de Contagem Causado pela Folga no Tubo de Acesso	253
6.6.1 - Resultados	253
6.6.2 - Discussão dos Resultados	253
6.7 - Ensaios dos C.P.'s com Defeitos Simulados	258
6.7.1 - Resultados	258
6.7.2 - Discussão dos Resultados	259
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA	264
7.1 - Conclusões	264
7.2 - Sugestões para Pesquisa	267
APÊNDICE A - PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÃO	269
APÊNDICE B - A ESTABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	271
B.1 - A Estabilidade do Scaler	271
B.2 - A Estabilidade do Detetor	271
BIBLIOGRAFIA	273

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO: O PROBLEMA GERAL DOS ENSAIOS DE INTEGRIDADE. OBJETIVOS DA TESE.

Conforme o nome indica, os ensaios de integridade em uma estaca escavada são ensaios realizados para verificar a integridade do fuste da estaca, entendendo-se por integridade a continuidade, plenitude de seção e qualidade do concreto. Tais ensaios se mostram importantes na medida em que fundações bem sucedidas dependem tanto do comportamento adequado do terreno ao qual são transferidas as cargas como do comportamento estrutural da própria estaca. Por sua vez, o comportamento adequado das estacas escavadas como membros estruturais depende de não possuírem em si descontinuidades ou defeitos significativos tais como juntas frias, concreto contaminado por solo, falta de cobrimento da armação (quando houver), estrangulamento da seção transversal da estaca, e outros mais.

As estacas escavadas têm apresentado uma utilização cada vez maior. Contribuíram para tanto, além do progressivo desenvolvimento dos equipamentos de perfuração, várias vantagens desse tipo de fundação. Por exemplo, a economia na execução em relação aos tubulões a ar comprimido. As estacas escavadas podem ser instaladas nas proximidades de edificações, já que o processo executivo se desenvolve tanto com a ausência de vibrações significativas do terreno circundante como também sem o levantamento deste. Outro fator favorável é a relativa rapidez de execução desse tipo de estaca, cujo comprimento pode ser ajustado às variações imprevistas do perfil geotécnico.

Como qualquer tipo de fundação profunda, as estacas escavadas estão sujeitas a apresentar defeitos decorrentes de má execução, os quais podem comprometer seu desempenho. Como, em geral, são estacas que suportam cargas elevadas, a realização das provas de carga convencionais é muito onerosa, sendo, ainda, difícil a substituição dessas estacas por outros elementos de fundação em caso de necessidade.

Decorrem daí duas preocupações: 1ª) Dar à execução um esmerado cuidado com a observância de um conjunto de normas e preceitos já bem estabelecidos atualmente; 2ª) Desenvolver um tipo de ensaio de integridade não destrutivo e confiável que, sem substituir as provas de carga convencionais, definha, satisfatoriamente, a integridade estrutural da estaca. O objeto dessa tese se enquadra nesse último caso.

Os tipos de defeitos em estacas escavadas e as maneiras com que se pretende evitá-los são assuntos algo exten - sos, e estão além do escopo deste trabalho. Boas discussões sobre ambos os temas podem ser encontradas em BAKER e KHAN (1971) ², THORBURN e THORBURN (1977) ⁵⁴, REESE (1978) ⁴⁶, PINTO (1981) ³⁶ e AOKI (1981) ¹, entre outros.

A respeito dos ensaios de integridade em geral são tecidas a seguir algumas considerações preliminares, vistas como de interesse para melhor compreensão do assunto.

É de importância capital entender, como já foi dito, que os ensaios de integridade jamais substituem a prova de carga. Tais ensaios pretendem verificar apenas a integridade do fuste concretado in situ, e não a interação solo-estaca, função precípua da prova de carga. Como observa WELTMAN (1977) ⁵⁹ o resultado satisfatório de um ensaio de integridade não é,

de modo algum, uma garantia de que a estaca transferirá sua carga ao terreno de maneira também satisfatória. É apenas uma condição necessária para isso, mas não suficiente..

Por outro lado, às provas de carga convencionais, além do problema de sua interpretação, podem ser feitas algumas críticas (DAVIS e DUNN, 1974) ⁷:

- 1- As provas de carga são muito caras e demoradas.
- 2- Em decorrência disso normalmente apenas um reduzido número de estacas é ensaiado, número este que não é suficiente para fornecer resultados estatísticos significativos. Pode-se acrescentar, ainda, que muitas vezes são escolhidas para ensaio justamente as estacas suspeitas, por razões óbvias. Nestes casos, então, os resultados não terão qualquer significado estatístico se comprovado o defeito.
- 3- Assim, as provas de carga de fato só avaliam o comportamento das estacas ensaiadas, pelo que não servem para localizar estacas defeituosas.
- 4- As provas de carga não fornecem informações sobre as reais dimensões da estaca sob o terreno, e nem examinam a homogeneidade e qualidade do concreto. Conforme observa WELTMAN (1977) ⁵⁹, defeitos como descontinuidades, vazios, contaminação do concreto por solo e falta do cobrimento da armação podem não afetar o desempenho da estaca a curto prazo, durante a prova de carga. Porém o comportamento a longo prazo, sob as cargas normais de trabalho, pode ser significativamente prejudicado.
- 5- As estacas a serem ensaiadas podem receber do empreiteiro um maior cuidado na execução, levando a resultados ilusórios,

não representativos das condições das demais estacas.

6- Após a prova de carga a estaca eventualmente é desconsiderada, não fazendo parte da fundação (em terrenos friáveis: solos cimentados, etc).

As provas de carga, portanto, não são propriamente um ensaio de verificação da integridade, mas o meio mais adequado para se investigar a interação solo-estaca, ou para se certificar de que esta ocorre conforme o esperado. Ainda assim, no caso de terrenos saturados compressíveis e pouco permeáveis, apenas o comportamento a curto prazo pode ser convenientemente avaliado.

O ensaio ideal para verificação da integridade deveria ser passível de aplicação em qualquer estaca escavada e ser capaz de revelar, com clareza e rapidez, a natureza e a extensão de todos os defeitos, localizando-os tanto seção transversal como em profundidade no fuste.

Evidentemente ensaios assim não existem e certamente jamais estarão disponíveis. No entanto, as ponderações acima são muito úteis para se julgar e comparar os ensaios existentes, a partir da distância entre o conseguido e o pretendido. Neste julgamento também não se deve esquecer da importante questão dos custos.

As vantagens e desvantagens dos vários ensaios de integridade decorrem da própria concepção de cada um deles. Essa diversidade de concepção se deve à maneira como foi e é atacado o problema da integridade pelos diversos idealizadores e pesquisadores dos ensaios, partindo de equipamentos e facilidades já existentes ou criando novos aparelhos e métodos. No primeiro caso, por exemplo, se incluem a escavação, a perfuração vertical do fuste, a inspeção por câmara de TV. No segundo caso pode-se

citar, entre outros, o ensaio vibratório, a sondagem sônica e a sondagem gama, objeto desta pesquisa. Adotando abordagens bem diferentes seus métodos preconizam o exame visual do fuste, exterior ou interior, enquanto outros procuram avaliar o concreto indiretamente, medindo a velocidade do som no mesmo ou sua densidade, caso este da sondagem gama. Observando-se as diferentes concepções dos ensaios fica então patente que há qualidades e falhas decorrentes das mesmas. Por outro lado, observa WELTMAN (1977) ⁵⁹ que algumas vezes as vantagens e desvantagens dos métodos são, em certo grau, dependentes também das condições do terreno e do processo construtivo da estaca, que podem intrinsecamente propiciar certas situações e tipos de defeitos que são mais vantajosamente examinados por alguns métodos do que por outros.

Com o advento dos equipamentos de perfuração de grande capacidade vem aumentando continuamente o emprego de estacas escavadas de grande diâmetro, tanto por razões técnicas como econômicas. Por possuírem grande capacidade de carga, muitas vezes pode ser vantajoso que uma única delas substitua um grupo de estacas convencionais, com o que salta aos olhos sua grande responsabilidade estrutural e a necessidade dos chamados ensaios de integridade.

Diante de tudo que já foi dito até aqui avulta a importância desses ensaios e o crescente interesse em conhecê-los, aplicá-los e desenvolvê-los. O uso de um adequado e bem planejado programa de ensaios de integridade pode livrar o empreiteiro e o dono da obra de problemas futuros de maior gravidade. É recomendável que a decisão sobre que ensaio(s) utilizar e como empregá-lo(s) tenha lugar ainda ao tempo do projeto, para

que haja a melhor adequação do(s) mesmo(s) ao método construtivo das estacas e ao cronograma da obra.

Atualmente os ensaios de integridade ainda não são considerados um critério estabelecido de controle de qualidade e aceitação, notadamente no Brasil. Aqui, talvez, mais pela falta de disponibilidade dos próprios ensaios mais modernos. Porém no exterior (EUA e Europa principalmente), apesar de já estar bem mais difundida a sua prática, nota-se alguma prevenção de parte dos engenheiros em aceitar novos métodos que ainda não lhes são familiares (WELTMAN,1977)⁵⁹, o que de certa forma é natural. No entanto tudo isso se dá num quadro de crescente utilização e aceitação dos ensaios, como também de renovação dos esforços em sua pesquisa.

Contudo, a questão dos ensaios de integridade, embora já devidamente equacionada em relação ao que se pretende obter, não está satisfatoriamente resolvida no todo, ainda que se tenha conseguido enormes progressos. Uma característica comum, presente em maior ou menor grau em todos os ensaios, é que as informações obtidas são, até o momento, mais qualitativas do que quantitativas. Por isso mesmo alguns autores como BAKER e KHAN (1971)² consideram que uma investigação adequada da integridade deveria comportar a utilização de mais de um método, para que se pudesse cotejar informações de diferentes fontes e assim obter conclusões mais seguras. Embora no momento atual esta seja uma recomendação acertada do ponto de vista técnico, lembra WELTMAN(1977)⁵⁹ que tal procedimento certamente aumentará os custos e incorrerá em um maior dispêndio de tempo.

O mesmo autor aponta ainda que, presentemente, alguns defeitos que são importantes em certas circunstâncias po-

dem não ser percebidos, enquanto outros de menor significado o são. Em outras vezes resultados há que se apresentam dúbios, com interpretação duvidosa, dificultando a avaliação da extensão e importância dos defeitos.

Assim, destacada a relevância dos ensaios de integridade pelas valiosas informações que conseguem proporcionar, justifica-se também a sua pesquisa pelo que ainda é necessário aperfeiçoar ou criar nesse campo. Daí o interesse em realizar o presente trabalho de tese.

Apresenta-se primeiramente uma revisão com alguma minúcia dos vários métodos de ensaio disponíveis na atualidade, na intenção de que se possa confrontar com certa base o método pesquisado com os demais, e mesmo estes entre si.

A seguir vem a pesquisa propriamente dita, que se restringiu em estudar, através de ensaios de laboratório, a sondagem gama de estacas escavadas pelo método da dispersão, ou retrodifusão. Foi feita a avaliação preliminar do desempenho de uma sonda nuclear à base de radiação gama para, com base nos resultados obtidos, se decidir sobre torná-la ou não operacional no campo futuramente. Para tanto foram realizados ensaios objetivando estudar a sensibilidade da sonda a vários tipos de defeitos, simulados em corpos de prova de concreto. Antes disso procedeu-se a ensaios no sentido de otimizar o desempenho do aparelho, com a escolha da sua melhor geometria (distância ótima fonte-detetor), visando conciliar um erro pequeno na densidade medida com uma área ensaiada razoável ao redor dos tubos de acesso e uma sensibilidade adequada a variações de densidade, três coisas compatíveis apenas em parte. Concluiu-se então, com base nos ensaios, sobre a efetividade prática da sondagem gama na verifica

ção da integridade de estacas escavadas, apresentando-se ainda su
gestões para futuras pesquisas nesse tema.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Os Métodos de Verificação da Integridade

Os métodos de verificação da integridade de estacas escavadas existentes atualmente podem ser classificados em dois grupos: o dos métodos que não necessitam de preparação prévia da estaca e o daqueles que exigem essa preparação.

1- Métodos que prescindem da preparação prévia da estaca:

- Escavação do terreno circundante.
- Perfuração vertical do fuste.
- Utilização de um medidor de calibre em perfurações verticais no fuste.
- Inspeção por câmara de TV de perfurações verticais no fuste.
- Método sísmico com sensor superficial.
- Ensaio vibratório.
- Ensaio de impacto

2- Métodos que exigem a preparação prévia da estaca:

- Método sísmico com sensor(es) embutido(s).
- Compressão integral do fuste.
- Sondagem sônica.
- Sondagem gama.

Os métodos que são aplicados à estaca sem a sua preparação prévia podem, portanto, ser executados em qualquer estaca da obra, ao acaso, o que reforça a possibilidade de que aquela verificada seja representativa das demais. Com esses métodos pode-se, ainda, inspecionar quantas estacas se desejar, evidentemente que dentro das necessidades técnicas e das verbas e

tempo disponíveis para tanto.

Poderiam ainda ser introduzidos entre os métodos que não exigem a preparação prévia da estaca aqueles chamados de métodos elétricos, dos quais WELTMAN(1977) ⁵⁹ cita 4 tipos básicos, porém sem comentar-lhes a teoria ou a interpretação dos resultados. A citação é mais de cunho informativo. Salienta o autor que esses métodos estão ainda em caráter experimental, necessitando portanto de maiores esforços para se tornarem confiáveis do ponto de vista da interpretação dos resultados. Tais métodos, no entanto, tiveram origem em ensaios geofísicos similares, já antes utilizados na identificação de camadas do terreno. Anteriormente a WELTMAN(1977) ⁵⁹, BOBROWSKI et alii (1970) ⁵ já haviam mencionado experiência própria com um dos métodos elétricos - aplicado num canteiro em Londres -, sem, no entanto, apresentarem maiores detalhes. Segundo os autores os resultados obtidos não foram conclusivos, possivelmente devido à pouca experiência na sua interpretação. Portanto, devido a ainda carecerem de interesse prático - e também à ausência de menção a esses métodos em artigos mais recentes, como os de STAIN (1982) ^{50/51} -, encerra-se aqui a referência aos métodos elétricos.

O método de compreensão integral do fuste, o método sísmico com sensores embutidos, a sondagem sônica e a sondagem gama, pela sua própria concepção não podem prescindir da preparação prévia da estaca. Esta é feita invariavelmente antes da concretagem, uma vez que tal preparação consiste em providenciar, conforme o método, hastes, sensores ou tubos ao longo do fuste - estes dois últimos presos à armação -, e que se tornam incluídos na estaca após a concretagem. Essa característica comum o-

briga a que se determine com a devida antecedência quais estacas serão verificadas, o que pode fazer com que o construtor tenha mais cuidados na execução das mesmas. Sendo assim corre-se o risco da inspeção ser realizada em estacas que podem, em certa medida, não representar as demais no que diz respeito à integridade. WELTMAN(1977)⁵⁹ chama ainda a atenção para o caso de estacas escavadas com a seção fortemente armada, quando a instalação de tubos de acesso internos à armação - indispensáveis a alguns ensaios de integridade -, pode aumentar ainda mais a probabilidade do concreto ser "engaiolado" e não envolver a armação como é necessário. Em contrapartida aponta WHITAKER(1974)⁶⁰ que a simples instalação de tubos nas estacas, com o conhecimento de que a integridade será verificada, já pode contribuir para diminuir o número de estacas defeituosas, ao levar o empreiteiro a ter mais cuidados na execução das mesmas por saber que serão inspecionadas. Porém, não resta dúvida de que tal afirmativa é mera especulação.

Todas essas considerações, no entanto, não devem levar à conclusão precipitada de que os métodos com preparação prévia da estaca sejam inferiores ou menos confiáveis. O indiscutível é que tais métodos apresentam uma limitação ou desvantagem que o outro grupo citado não possui. Porém, se por um lado a preparação prévia da estaca é em si mesma uma limitação, por outro lado ela traz importantes vantagens como, por exemplo, o acesso ao interior do fuste. O assunto é aprofundado devidamente no decorrer deste capítulo, pela análise dos diferentes métodos no que têm de essencial.

2.2 - Métodos sem Preparação Prévia da Estaca

2.2.1 - Escavação do Terreno

É um dos métodos mais conhecidos para a inspeção de estacas escavadas suspeitas. Visa expor o fuste diretamente ao exame visual do observador.

Na maior parte das vezes a escavação se constitui de um poço adjacente ao fuste (fig.II.1), quando possível feito pelo próprio equipamento de perfuração usado no canteiro para as estacas. Embora esta solução exponha apenas um lado da estaca é a que permite o alcance das maiores profundidades. Deve haver, no entanto, condições de terreno favoráveis tais como o nível d'água abaixo do ponto que se pretende atingir. Sendo assim pode-se chegar à ponta das estacas para verificar o concreto deste trecho e o contato da base com a camada em que se assenta.

Para a segurança do pessoal de inspeção e reparos é uma boa prática escorar ou revestir os poços além de 2m de profundidade, a menos que a escavação seja feita em talude suficientemente inclinado. Esta última solução, porém, tem o seu custo rapidamente aumentado com a profundidade, podendo ainda ser inviabilizada pela falta de espaço ao redor da estaca.

WELTMAN(1977) ⁵⁹ cita o caso de galerias e túneis escorados, empregados para examinar estacas escavadas situadas sob uma laje, o que se tornou necessário devido a sérios problemas de fundação que se manifestaram já num estágio mais avançado da construção.

Em qualquer caso, principalmente naqueles de estacas com pouco tempo de concretadas, deve-se tomar o cuidado necessário para que as mesmas não sejam danificadas pelo equipamento de perfuração.

Observa bem WELTMAN(1977)⁵⁹ que, apesar de expor a estaca de maneira direta, a escavação não é propriamente um ensaio de verificação da integridade, já que revela apenas defeitos que afloram à superfície do fuste. Muitas vezes a escavação adjacente é empregada como um meio, por sinal bastante positivo neste aspecto, de se determinar a extensão, natureza e gravidade de um defeito localizado por outros métodos, como a sondagem rotativa, por exemplo. É sob este enfoque que BAKER e KHAN(1971)² abordam o método. Ato contínuo, a escavação é também usada como um acesso para se reparar as falhas constatadas, seja substituindo o concreto poroso ou contaminado, seja preenchendo com concreto adequado cavidades porventura existentes.

Vantagens do método:

- 1- O fuste pode ser examinado por observação direta.
- 2- Pode-se executar furos horizontais na estaca com marteletes, bem como extrair corpos de prova para rompimento (PINTO,1981)³⁶.
- 3- O método permite que os defeitos porventura constatados possam ser medidos e fotografados (SIMONS e MENZIES, 1981)⁴⁸.
- 4- É um método adequado e relativamente barato para se investigar defeitos a pequenas profundidades.
- 5- O método prescinde da preparação prévia da estaca, podendo ser aplicado a qualquer delas na obra.

Desvantagens do método:

- 1- A inspeção visual revela apenas defeitos que possuam traços na superfície exposta do fuste.
- 2- Os poços adjacentes expõem apenas um lado da estaca escavada, principalmente se esta é de grande diâmetro.
- 3- Em muitas ocasiões o nível do lençol freático limita grande-

mente a profundidade da escavação, só permitindo por a descoberto trechos próximos ao topo da estaca.

4- No caso de poços perfurados com equipamentos, e conforme sua profundidade, o método não raro alcança custos que igualam ou superam o da própria estaca a examinar, preferindo-se às vezes como alternativa a provisão de estacas adicionais (WELTMAN, 1977) ⁵⁹. Tal faz com que o método seja mais adequado para a inspeção e reparo de estacas escavadas de grande diâmetro.

2.2.2 - Perfuração Vertical da Estaca

A perfuração pode ser realizada tanto por sonda - gem rotativa como à percussão.

2.2.2.1 - Perfuração por Sondagem Rotativa

A sondagem rotativa tal como realizada em rocha, com a obtenção de testemunhos do material do fuste, é o método tradicional para verificar a integridade de - estacas suspeitas. Embora vários autores se refiram à sondagem como sendo realizada ao longo do eixo da estaca (BOBROWISKI et alii, 1970 ⁵; SIMONS e MENZIES, 1981 ⁴⁸; PINTO, 1981 ³⁶), certamente esta é a prática quando se determina apenas uma única perfuração. O número de perfurações vai depender do quanto se suspeita da integridade da estaca, do grau de risco que pode ser tolerado e, após pesados estes fatores, da economia que se pretende. Geralmente o grande diâmetro de uma estaca é indicativo de que ela suporta cargas elevadas, possuindo portanto grande responsabilidade estrutural. Em tais circunstâncias a tolerância a defeitos é compreensivelmente pequena e preve-se mais fu-

ros. WELTMAN(1977)⁵⁹ recomenda pelo menos três sondagens para estacas com mais de 1,0m de diâmetro. BAKER e KHAN(1971)² se referem a um caso onde 11 sondagens foram feitas para um diâmetro de aproximadamente 3,0m. Os mesmos autores reportam ainda que, para agregados de dimensões que equivalem no Brasil às da brita 3, a experiência mostrou que quanto maior o diâmetro da sondagem melhor é a recuperação de testemunhos.

Vantagens do processo:

- 1- Os testemunhos recuperados permitem uma avaliação bem razoável do concreto em sua homogeneidade. Pode-se detectar, pela integridade dos próprios testemunhos, a existência de vazios ou falhas e a intrusão de material indesejável no fuste. Como lembram BAKER e KHAN(1971)² corpos de prova preparados a partir dos testemunhos podem ser rompidos, fazendo-se correção nos resultados para diâmetros menores que 3 vezes o diâmetro máximo do agregado.
- 2- A verticalidade do furo pode ser mantida mais facilmente do que na perfuração à percussão.
- 3- Pode-se decidir pela verificação de qualquer estaca, sem a preparação prévia desta antes da concretagem.

Desvantagens do processo:

- 1- Quando a sondagem não é realizada por pessoal altamente qualificado e equipamento adequado, a recuperação de testemunhos pode ser decepcionante mesmo em concreto íntegro, confundindo em vez de esclarecer. Esta afirmação é uma constante em praticamente todos os autores já citados acima.
- 2- A sondagem rotativa tem custos elevados, sendo várias vezes mais cara que a perfuração à percussão.
- 3- É um processo bastante demorado, portanto não sendo recomenda

dável quando muitas estacas devem ser verificadas. SIMONS e MENZIES(1981) ⁴⁸ se referem a uma velocidade de perfuração de 10m por cada dois dias de trabalho, BOBROWISKI et alii(1970) ⁵ a 9-12m/2 dias e WELTMAN(1977) ⁵⁹ a aproximadamente 0,5m/hora.

4- O processo só detecta defeitos que estejam no caminho do furo, o que exige, como já foi dito, várias sondagens para as estacas de maior diâmetro.

2.2.2.2 - Perfuração à Percussão Rotativa

Obviamente a perfuração à percussão não permite a obtenção de testemunhos, já que o avanço se dá às custas da trituração do concreto da estaca e a concomitante remoção dos detritos por circulação de água ou ar comprimido. A perfuração deve ser acompanhada atentamente, observando-se tanto a velocidade do avanço, indicativa da resistência do concreto, como a quantidade e cor dos detritos expulsos do furo, com o que se pretende detetar vazios ou a presença de material indesejado no fuste. Segundo WELTMAN(1977) ⁵⁹, em perfurações a seco, a observação de água no furo seria indicativa de concreto poroso ou descontinuidade no fuste, por onde a água do terreno teria penetrado. Ainda conforme o autor, perfurações de até 300mm de diâmetro podem ser obtidas, dependendo do equipamento.

Vantagens do processo:

- 1- A velocidade de perfuração é bem maior que a da sondagem rotativa. SIMONS e MENZIES(1981) ⁴⁸ citam avanços da ordem de 60m/dia, já levados em conta o tempo da inspeção das paredes do furo por circuito fechado de TV. BOBROWISKI et alii(1970) ⁵ se referem a resultados praticamente idênticos.
- 2- O processo à percussão é bem mais barato que o da sondagem rota

tiva.

- 3- Pode-se ensaiar qualquer estaca, já que não é necessária a preparação prévia da mesma antes da concretagem.

Desvantagens do processo:

- 1- Sem a complementação da câmara de televisão ou do medidor de calibre o que se consegue é apenas uma avaliação não mais que grosseira da integridade.
- 2- O processo só detecta defeitos que estejam na trajetória do furo.
- 3- Observa WHITAKER(1974)⁶⁰ que a verticalidade da perfuração é difícil de ser mantida, o que resulta no desconhecimento da real posição do furo na seção da estaca.

2.2.3 - Sonda de Calibre

O medidor ou sonda de calibre é um torpedo com três pequenas hastes ou braços laterais (fig.II.2). Com o deslocamento do aparelho ao longo do furo as irregularidades das paredes movimentam as hastes, tendo-se para cada posição das mesmas uma leitura do diâmetro na profundidade correspondente. Os valores dos diâmetros são registrados na superfície por aparelhos eletrônicos que captam os sinais elétricos enviados pela sonda. Desse modo é traçado o perfil "diâmetro versus profundidade" de cada furo ensaiado. O método é bastante sensível. Segundo um perfil apresentado por BAKER e KHAN(1971)² é possível detetar variações no diâmetro da ordem de 1mm, ou até mesmo de centésimos de milímetro (PINTTO, 1981)³⁶.

A filosofia do método é de que aumentos do diâmetro que compreendam um certo trecho do furo podem indicar vazios, uma zona de concreto mais fraco e portanto mais danificado na perfura

ção - como uma junta fria, etc. Tal fato passa a sugerir então in vestigações adicionais por outros métodos.

Segundo indica WELTMAN(1977)⁵⁹ o medidor de calibre requer furos que variam de 75 a 200mm para os quais se utiliza a perfuração à percussão, por ser bem mais barata. No entanto, nada impede de se empregar a sonda de calibre em furos já existentes de sondagens rotativas, desde que de tamanho adequado.

Entre os autores consultados não ha qualquer alusão aos custos. No entanto o método não deve ser mais caro que a sondagem rotativa. Pode-se concluir assim desde que, para um único furo, a inspeção por câmara de TV em perfuração à percussão possui custos que se equiparam aos da sondagem rotativa, sendo que sua aparelhagem é mais sofisticada que a do medidor de calibre(WELTMAN, 1977)⁵⁹.

Vantagens do método:

- 1- O registro do diâmetro é automático e contínuo, feito com grande precisão para efeitos práticos.
- 2- O método é rápido, podendo-se prever uma velocidade de ensaio equivalente ao da inspeção por câmara de TV, isto é, 50 a 60m/dia, levando-se em conta o tempo de perfuração e medição.
- 3- Descontinuidades e vazios de pequeno tamanho podem ser percebidos (BAKER e KHAN, 1977)².
- 4- Pode-se ensaiar qualquer estaca da obra, sem a necessidade da preparação anterior à concretgaem.

Desvantagens do método:

- 1- Variações do diâmetro do furo que sejam significativas apenas sugerem a presença de defeitos. A confirmação vai então depender de algum outro método, por exemplo câmara de TV ou sonda - gem sônica.

- 2- Porque não prescinde da perfuração o método só percebe defeitos que se encontrem no caminho do furo.
- 3- Como a verticalidade da perfuração à percussão é difícil de ser mantida, defeitos detetados pela sonda de calibre só podem ser devidamente localizados na seção transversal da estaca com o auxílio posterior de um inclinômetro, que indica o desvio do furo em relação à vertical (BAKER e KHAN, 1971)². Tal providência, porém, onera inevitavelmente os custos.

2.2.4 - Inspeção por Câmera de TV

A câmara de TV se constitui em um torpedo, com a objetiva e lâmpada para iluminação situados na extremidade inferior. Um cabo na outra extremidade serve tanto para prover energia à câmara e levar as imagens à superfície como para sustentar o aparelho e baixá-lo no furo. Este, segundo WELTMAN (1977)⁵⁹, deve ter diâmetro entre 50 e 110mm, sendo geralmente empregada a perfuração à percussão por ser a mais barata. A câmara possui um ângulo de visão de 360° e, para centrá-la adequadamente no furo, são previstos estabilizadores.

Vantagens do método:

- 1- O método é rápido. SIMONS e MENZIES(1981)⁴⁸, assim como BOBROWSKI et alii (1970)⁵, se referem a velocidade de inspeção da ordem de 60m/dia, contados os tempos de perfuração e observação com a câmara.
- 2- As imagens geradas podem ser vistas em um vídeo na superfície e são de muito boa qualidade, desde que a água porventura existente no furo não seja muito suja. O método permite

um detalhado exame do concreto, podendo descobrir pequenos defeitos. As imagens podem ser gravadas em vídeo-tape, ao qual é possível acrescentar um comentário sonoro. Como alternativa, ou adicionalmente, pode-se fotografar no vídeo as imagens que mais interessarem.

- 3- A aplicação do método não exige a preparação da estaca anteriormente à concretagem, com o que se pode ensaiar qualquer delas.

Desvantagens do método:

- 1- Para uma ou duas perfurações apenas os custos do método se equivalem aos da sondagem rotativa, porém decrescem bastante à medida que o número de furos aumenta (WELTMAN, 1977) ⁵⁹
- 2- O método deteta apenas os defeitos que estejam na trajetória do furo.
- 3- A clareza das imagens pode ser prejudicada pela presença no furo de água suficientemente turva para tanto. A água pode ser do próprio processo de perfuração, vir da extremidade inferior do furo quando este chega à base da estaca ou, então, ser proveniente de alguma descontinuidade do fuste pela qual a água do terreno penetra. WELTMAN(1977) ⁵⁹ sugere que se tente expulsá-la do furo com ar comprimido ou, quando se nota um fluxo persistente de água para a perfuração, que se adicione à mesma um agente floculador para torná-la mais clara, o que deve ser feito pelo menos 24 horas antes do ensaio para melhores efeitos.
- 4- Mais uma vez está presente o problema da verticalidade do furo, difícil de ser mantida pelo processo de perfuração à percussão.

2.2.5 - Ensaio Sísmico com Sensor(es) na Superfície

É também chamado de ensaio de eco. Consiste essencialmente em se aplicar um impacto único e mesmo pouco vigoroso na cabeça da estaca, monitorando-se o subsequente movimento do topo e dele tirando conclusões acerca da integridade do fuste.

A fig.II.3 mostra um esquema do equipamento de ensaio. Consta basicamente de: 1- sistema de impacto, podendo ser um martelo de mão e cinzel apropriados (HEARNE et alii, 1981) ¹⁷ ou uma barra de aço (pilão) em queda livre de certa altura (STEINBACH e VEY, 1975) ⁵² ; 2- um disparador, que ao golpe aciona o osciloscópio para o registro; 3- um acelerômetro ou geofone, que transmite ao osciloscópio o movimento da cabeça da estaca; 4- uma câmera Polaroid, para o registro permanente das oscilações do topo da estaca mostradas no osciloscópio.

No que concerne ao método duas espécies de ondas e lásticas, originadas na estaca pelo golpe, se mostram relevantes. Uma delas é a das ondas superficiais ou de Rayleigh, que se propagam na superfície do topo da estaca semelhantemente às ondas concêntricas que se desenvolvem na superfície de um líquido, quando a mesma é perturbada pontualmente. A outra espécie compreende ondas de compressão aproximadamente hemisféricas, cujas frentes de onda já são praticamente planas a uma distância do topo de apenas 1,5 diâmetros (STEINBACH e VEY, 1975) ⁵² . Estas ondas ao se propagarem ao longo do eixo da estaca (ondas longitudinais) se refletem em sua base ou em alguma descontinuidade importante do fuste, voltando à superfície onde são detetadas pelo geofone. No topo sofrem nova reflexão, repetindo-se o processo até que a e-nergia das ondas se dissipe.

Um resultado típico de ensaio sísmico pode ser visu

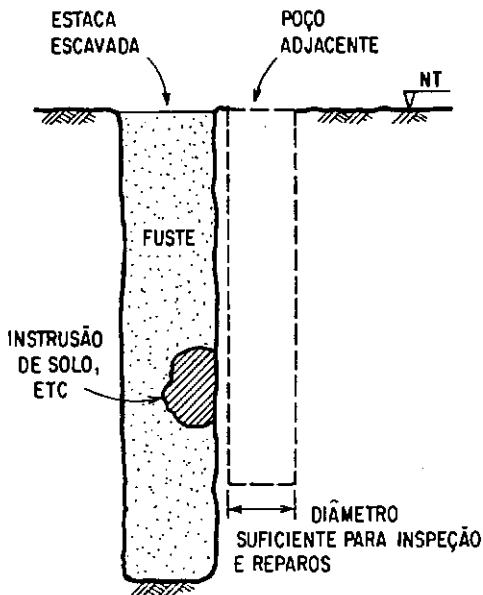


Fig. II.1 - Verificação por escavação.

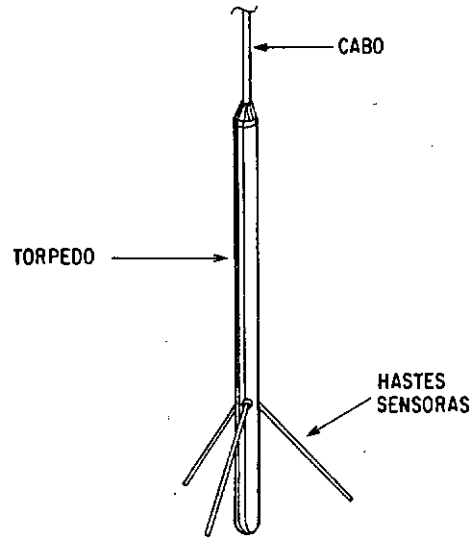
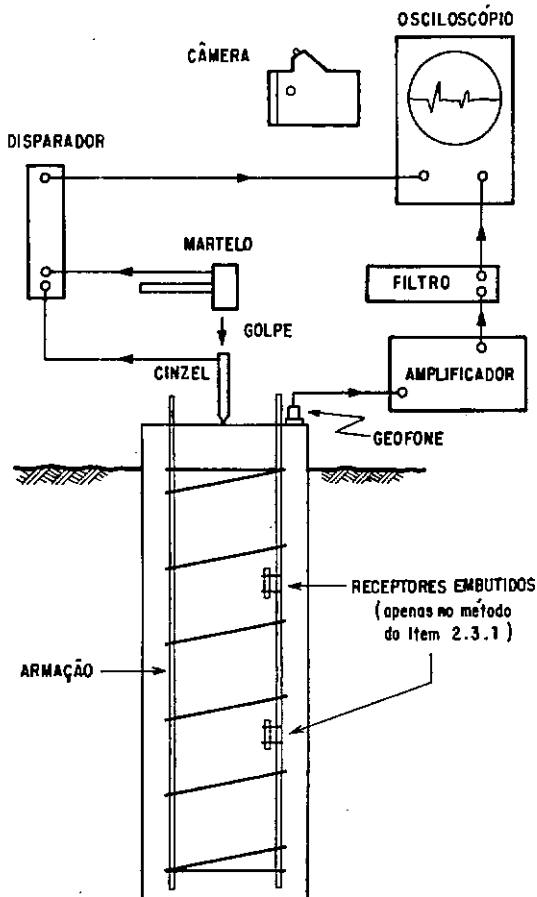
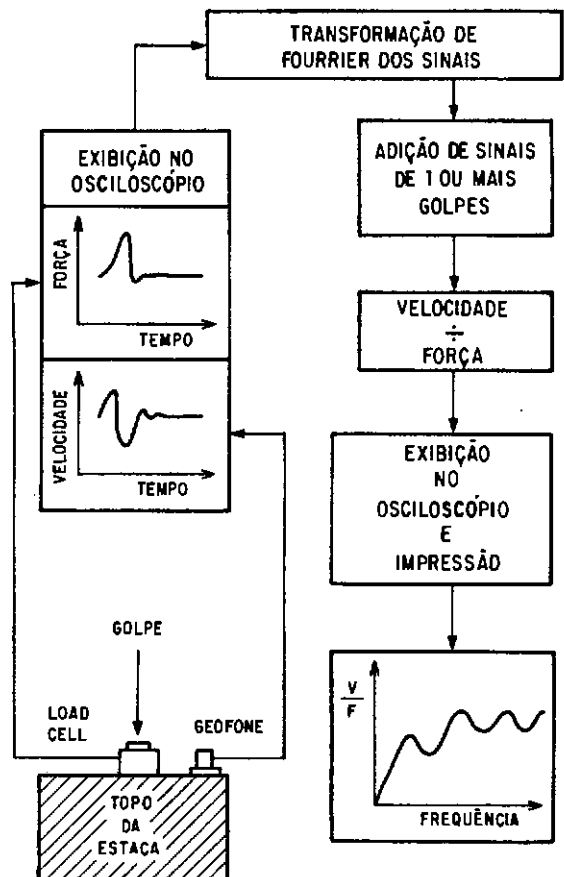


Fig. II.2 - Sonda ou medidor de calibre.

Fig. II.3 - Montagem do ensaio sísmico.
(HEARNE et alii, 1981)¹⁷Fig. II.4 - Sistema de medição do ensaio de choque.
(HIGGS e ROBERTSON, 1979)¹⁸

to na fig. II.5, conforme seria fotografado da tela do osciloscópio. O registro, após o golpe inicial (I), apresenta uma série de oscilações regulares e de alta frequência que decrescem no tempo - as ondas superficiais ou de Rayleigh (R) -, interrompidas por oscilações correspondentes às ondas longitudinais (L), refletidas parcialmente na base ou em uma descontinuidade significativa.

STEINBACH e VEY (1975)⁵² mostraram que a velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_L) é diretamente proporcional à velocidade das ondas superficiais (V_R), isto é, $V_L = C.V_R$, com o coeficiente C variando, para o concreto, de 1,80 a 2,00, com um valor médio de 1,90. Portanto, ao se medir V_R na cabeça da estaca pode ser obtida uma estimativa razoável de V_L , com o que se pode calcular a distância l do topo onde ocorreu a reflexão da onda longitudinal:

$$l = 2 V_L . \Delta t \quad (II.1)$$

com Δt determinado a partir do registro conseguido (Fig.II.5).

Caso ondas superficiais identificáveis não se desenvolvam no ensaio, o que pode ocorrer em estacas de pequeno diâmetro, não se pode evidentemente obter V_R , o mesmo ocorrendo quando as ondas superficiais não são periódicas, o que pode acontecer, por exemplo, quando o contorno do topo da estaca não for circular por algum motivo. O método torna-se, então, algo especulativo. A alternativa é se assumir uma velocidade da onda longitudinal V_L dentro de uma faixa considerada normal, para o concreto íntegro, como a dos valores constantes em HEARNE et alii(1981)¹⁷. Adotando-se por exemplo o valor de 4.000m/s calcula-se pela expressão II.1 a distância l do topo na qual se deu a reflexão da onda longitudinal, valor que pode ou não confirmar a continuidade do fuste.

Deve-se notar que a onda longitudinal ao alcançar uma descontinuidade relevante do fuste se reflete em parte, retornando ao topo em um tempo menor que o que seria de se esperar. Parte de sua energia continua a se propagar como onda - agora evidentemente mais atenuada -, podendo se refletir, por exemplo, na base da estaca e retornar ao topo, se a atenuação não for grande.

Ao se propagar numa estaca escavada a onda longitudinal também perde energia tanto no próprio fuste como, e principalmente, por absorção na interface estaca-solo, geralmente bastante rugosa nesse tipo de fundação. Portanto, levando em conta o binômio estaca-solo em presença da energia do golpe inicial, pode ocorrer que a atenuação da onda seja tal que em algumas estacas íntegras não haja meios de detectá-la após a reflexão na ponta. A absorção da energia da onda é justamente a responsável por raramente ser possível perceber o pulso da onda proveniente de uma segunda reflexão na base, mesmo em uma estaca sem defeitos (STEINBACH e VEY, 1975) ⁵². Por causa desses problemas o ensaio inicialmente só era aplicado a estacas de concreto pré-moldadas cravadas - para se constatar possíveis trincas ou danos de cravação -, devido às mesmas serem de menor porte e possuírem superfície lateral relativamente lisa.

Quando o diâmetro é grande em relação ao comprimento da estaca as ondas superficiais podem não se atenuar a tempo de permitir a observação da onda longitudinal refletida, o que anula o ensaio. Pode-se, então, empregar um filtro para reduzir a amplitude das ondas superficiais, o que, às vezes, impede a detecção das ondas refletidas, quando as frequências de ambas são próximas.

Portanto vê-se que, como observam HEARNE et alii

(1981) ¹⁷ , ainda são necessários aperfeiçoamentos tanto nas técnicas de ensaio como na interpretação dos registros, para que o potencial do método seja mais aproveitado e se obtenha conclusões mais seguras.

Vantagens do método:

- 1- Não sendo necessária a preparação prévia pode-se ensaiar qualquer estaca na obra.
- 2- Admitindo-se que a estaca seja íntegra e com o seu comprimento de projeto, pode-se estimar a velocidade de propagação da onda longitudinal V_L e, por esta, se ter uma idéia ainda que algo vaga da resistência do concreto, através de correlações.
- 3- O método é bastante rápido: WELTMAN(1977) ⁵⁹ se refere à verificação de até 40 estacas/dia.
- 4- Os custos de ensaio são pequenos, o que juntamente com (2) permite que se possa ensaiar grande número de estacas da mesma obra.
- 5- O ensaio pode ser realizado com um mínimo de interferência nas outras atividades do canteiro (STEINBACH e VEY, 1975) ⁵²

Desvantagens do método:

- 1- A determinação, com boa aproximação, da profundidade de um defeito registrado vai depender do grau de correção na estimativa de V_L a partir de V_R e, na impossibilidade de se obter V_R , do erro contido no valor assumido para V_L . Alertam HEARNE et alii (1981) ¹⁷ que quando o topo é muito irregular, o que não é raro em estacas escavadas, o erro em V_R (e V_L) pode ser grande.
- 2- A partir do término da concretagem é necessário esperar alguns dias para a aplicação do ensaio, uma vez que o concreto deve estar com resistência suficiente para permitir a propagação da

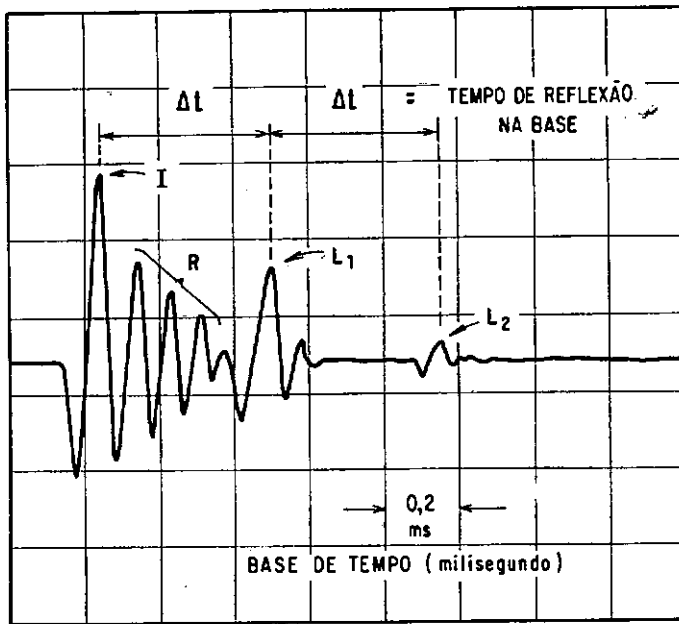


Fig. II.5 - Registro de ensaio sísmico. Vê-se o pulso inicial I (golpe), as ondas superficiais R, decaindo no tempo, e a onda L₁ refletida na base (estaca íntegra). É difícil uma segunda reflexão, L₂.

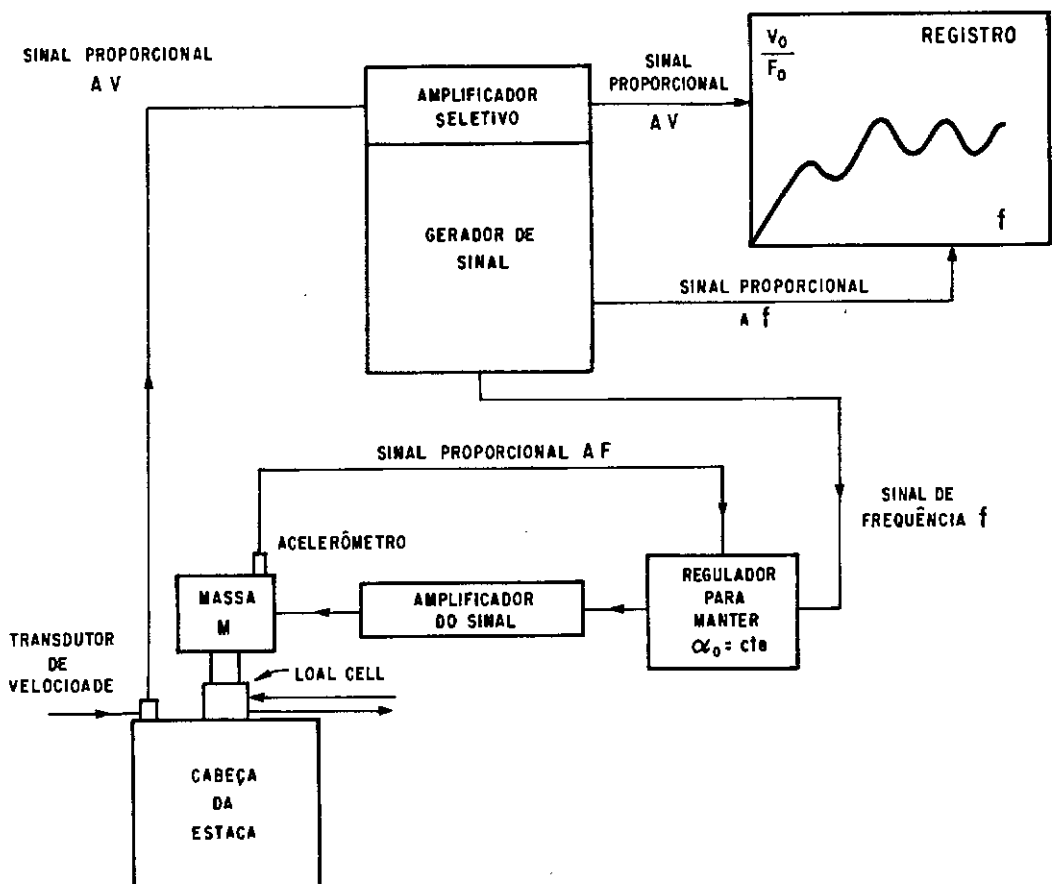


Fig. II.6 - Equipamento para o ensaio vibratório.
(Fonte: DAVIS e DUNN, 1974)⁷

onda elástica longitudinal.

- 3- A efetividade do ensaio está limitada por uma profundidade máxima da base da estaca, que é função da razão comprimento/diâmetro(L/D) e do terreno circundante. Por exemplo STAIN (1982)⁵⁰, para a argila de Londres, rija, esclarece que uma razão máxima L/D de 30:1 é realista. A limitação é tão maior quanto mais resistente for o terreno em torno da estaca.
- 4- Em alguns casos, devido aos problemas já acima mencionados, a onda longitudinal refletida pode estar ausente ou mascarada por interferências, o que torna o ensaio inconclusivo.
- 5- Quando há uma descontinuidade relevante que se estende por toda uma seção, a mesma bloqueia completamente sinais provenientes de maiores profundidades, o que impede a detecção de outros defeitos por acaso existentes (STEINBACH e VEY, 1975)⁵²
- 6- Não é possível determinar a natureza dos defeitos encontrados, que tanto podem ser intrusões significativas de solo ou lama de perfuração como concreto muito poroso ou variações relevantes na seção transversal (STEINBACH e VEY, 1975)⁵². Pondera STAIN(1982)⁵⁰ que o método não é capaz de diferenciar entre um bulbo e um estrangulamento no fuste, já que ambos os defeitos são capazes de refletir a onda longitudinal da mesma forma.
- 7- A extensão ou gravidade de um defeito encontrado não pode ser devidamente avaliada, embora se saiba que o ensaio na maioria das vezes só é conclusivo para descontinuidades de fato significativas, que se estendem por boa parte da seção.

2.2.6 - Ensaio Vibratório

Basicamente o ensaio vibratório consiste em se vi-

brar continuamente a cabeça da estaca dentro de um largo espectro de frequências, monitorando a velocidade da vibração e obtendo-se um registro com base no qual se conclui sobre as condições da estaca. O método foi desenvolvido a partir de 1968 por Paquet, no CEBTP, França.

A Fig.II.6 dá uma idéia do aparato de ensaio. Segundo DAVIS e DUNN(1974) ⁷, um vibrador eletrodinâmico, com uma parte vibrante de massa M , é solidarizado à cabeça da estaca regularizada 24 horas antes com argamassa. Um gerador fornece ao vibrador corrente alternada cuja frequência f pode variar de 20 a 5.000 Hz de modo contínuo. Com isto o vibrador aplica na cabeça da estaca uma força vertical senoidal $F = F_0 \cdot \sin \omega t = M \cdot \alpha$, sendo α a aceleração imposta à massa M . Portanto a máxima força aplicada é $F_0 = M \cdot \alpha_0$, onde $\alpha_0 = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot a$, sendo a a amplitude da vibração. A saída de um acelerômetro posto sobre a massa vibrante (Fig.II.6) é ligada a um regulador que ajusta a amplitude da vibração de modo que α_0 e F_0 se mantenham sempre constantes, independentemente da frequência de vibração. Uma célula de carga sob o vibrador permite a medição da força F aplicada à cabeça da estaca, em cuja periferia (Fig.II.6) um transdutor de velocidade registra continuamente a velocidade vertical V imposta à cabeça, que vibra na mesma frequência da massa M .

Durante o ensaio a frequência f de vibração é variada de 20 a 5.000 Hz de modo contínuo, ocorrendo para cada frequência uma velocidade máxima V_0 ($V = V_0 \cdot \sin(\omega t + cte)$) do topo da estaca. Um traçador automático plota as variações da razão V_0/F_0 contra a frequência f . V_0/F_0 é a chamada admitância mecânica da estaca, mais precisamente, do conjunto estaca/solo. Esse gráfico, para uma estaca cilíndrica íntegra, de concreto homogêneo e instalada

em solo de perfil também homogêneo, possui o aspecto da fig.II.8, e é algumas vezes chamado de "assinatura da estaca". Conforme ponderam DAVIS e DUNN(1974) ⁷ a onda de compressão devida à força F atravessa a estaca a uma velocidade V_L (item 2.2.5) e, sendo o fuste íntegro, se reflete em sua base retornando à superfície. Se a frequência f da pulsação aplicada no topo é tal que sucessivamente a onda refletida solicita a cabeça da estaca da mesma forma (compressão ou tração) e no mesmo instante que a tensão aplicada, então ocorre ressonância e V_o/F_o alcança um máximo, como nos picos da fig. II.8. Inversamente, se as solicitações da onda refletida e da força F aplicada são simultâneas mas contrárias, há interferência destrutiva, correspondente aos vales da referida curva. Em estacas longas ou naquelas circundadas por terreno resistente o eco(onda refletida na base) é bastante atenuado pelo solo circundante, resultando em uma menor amplitude entre picos e vales.

Para compreender melhor o registro obtido em uma estaca (Fig. II.8) pode-se considerar o caso simples de uma coluna ideal, apoiada apenas em sua base. Explicam DAVIS e DUNN(1974) ⁷, que aplicando ao topo da coluna uma força $F = F_o \cdot \sin \omega t$ em várias frequências, como no ensaio vibratório, as frequências nas quais ocorrem as ressonâncias estão sempre espaçadas de um valor $\Delta f = V_L/2L$, sendo V_L a velocidade de propagação da onda longitudinal de tensão na coluna e L seu comprimento. Para uma base rígida a menor frequência de ressonância terá um valor de $V_L/4L$ (Fig.II.7a). Já se a base é infinitamente compressível a menor frequência de ressonância apresenta um valor muito pequeno, como na Fig.II.7c. No caso de base elástica com compressibilidade como a dos solos, a ressonância acontece para uma frequência intermediária (Fig.II.7b). De fato, para uma estaca, o registro obtido se aproxima mais da

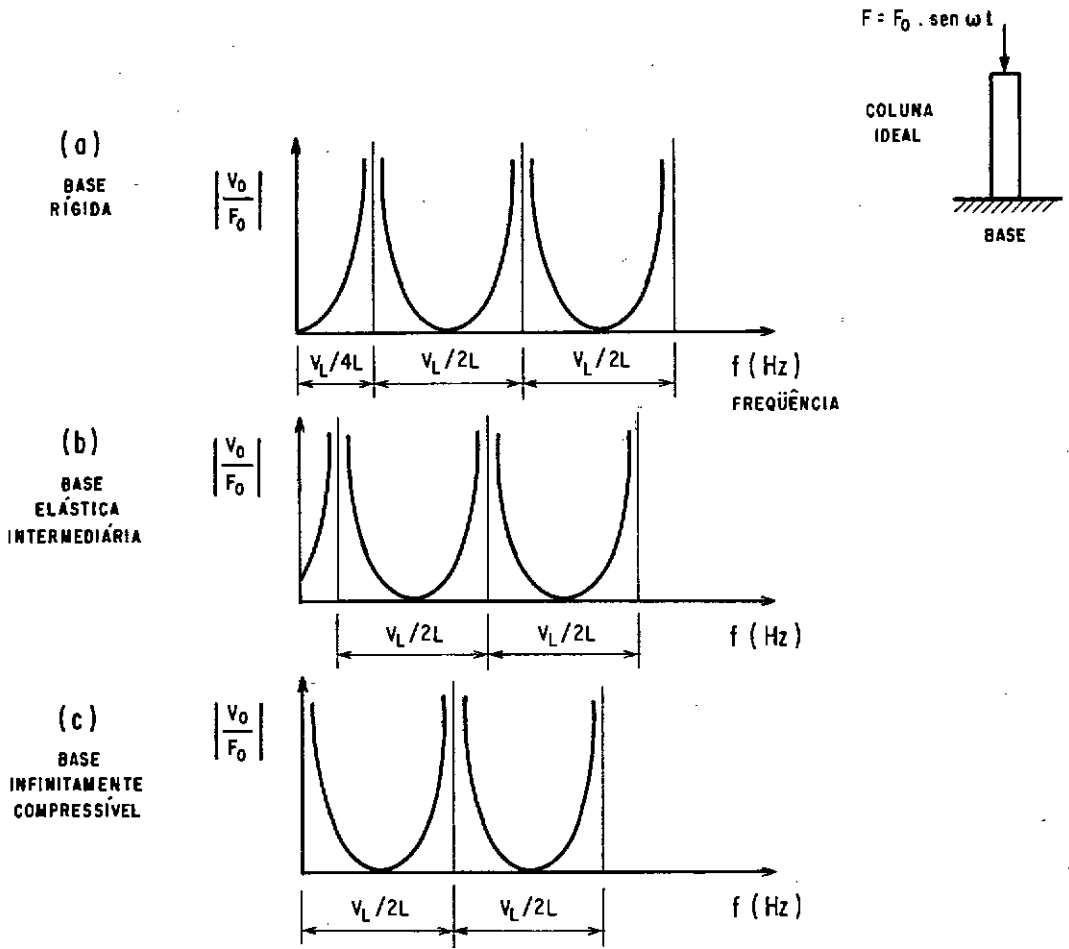


Fig. II.7 - Efeito da compressibilidade da base na frequência de ressonância de uma coluna ideal submetida ao ensaio vibratório (DAVIS e DUNN, 1974)⁷.

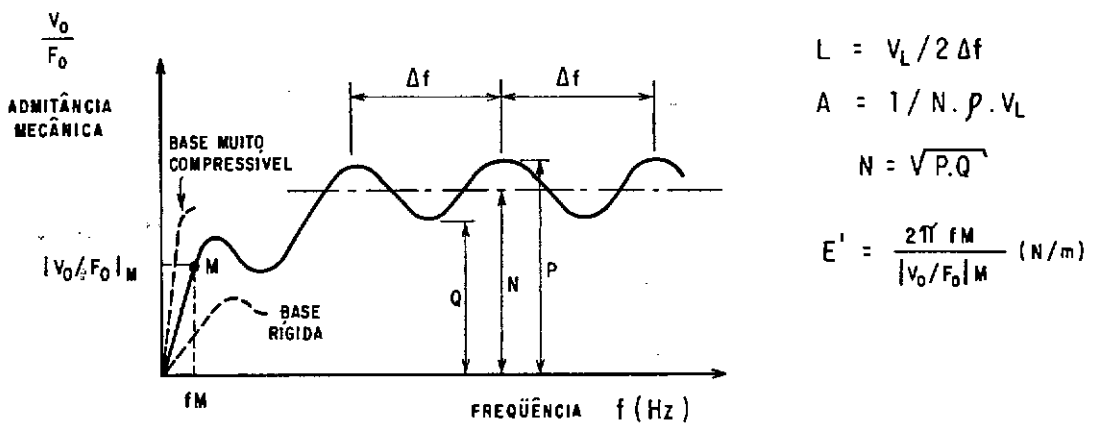


Fig. II.8 - Curva de resposta (ou assinatura) de uma estaca cilíndrica submetida ao ensaio vibratório (DAVIS e DUNN, 1974)⁷.

quele da fig. II.7b, ocorrendo que, devido à atenuação da onda longitudinal e à restrição lateral do solo, as ressonâncias e interferências não são como aquelas de uma coluna ideal, onde não há perda de energia da onda. Ao contrário, em uma estaca ocorre que as ressonâncias e interferências se dão de forma atenuada, com o que se obtém o registro da fig. II.8. Nesta estão indicados parâmetros relevantes na verificação da estaca.

Após o ensaio, com o registro indicado na fig. II.8 pode-se obter as seguintes informações acerca da estaca:

- 1- O comprimento L da estaca, a partir do intervalo Δf de frequência entre dois picos de ressonância. Da Fig. II.8:

$$L = V_L / 2 \Delta f \quad (\text{II.2})$$

No caso da existência de um estrangulamento ou descontinuidade significativa no fuste, ou mesmo de um bulbo, as ondas longitudinais se refletem apenas nessas irregularidades da mesma maneira e as ressonâncias ocorrem para um comprimento L correspondente à profundidade do defeito. Devido à atenuação da onda longitudinal à medida que atravessa a estaca, a diferença entre picos e vales da curva de resposta (Fig. II.8) pode ser diminuída a ponto de impedir a determinação de Δf e, portanto, de L . Assim, devido ao efeito cumulativo de atenuação da onda pelo solo, normalmente é improvável que se possa medir o comprimento de estacas com uma razão comprimento/diâmetro acima de 30:1 (DAVIS e DUNN, 1974)⁷

- 2- A área da seção transversal da estaca, A , a partir da admitância mecânica N da estaca, Fig. II.8: $N = \sqrt{P \cdot Q} = 1/\rho \cdot V_L \cdot A$ (DAVIS e DUNN, 1974)⁷, sendo ρ a massa específica do concreto e V_L o valor assumido para a velocidade de propagação da onda longitudinal (item 2.2.5). Ou, se a área A é conheci-

da ou assumida, pode-se estimar V_L e, desse modo, a resistência do concreto, através de uma correlação de ambos os parâmetros.

- 3- A rigidez da estaca para carregamento dinâmico, E' . Para baixas frequências da força F o sistema estaca/solo vibra conjuntamente, como um todo, com a curva de resposta se comportando de modo linear até o ponto M, Fig. II.8. Neste trecho pode-se medir a rigidez dinâmica da estaca, E' , definida como o inverso de sua inclinação:

$$E' = \frac{2.\pi.f_M}{(V_0/F_0)_M} \quad (N/m) \quad (II.3)$$

Naturalmente, procurou-se correlacionar a rigidez dinâmica E' e a estática, E , esta obtida na porção linear da curva carga / recalque de uma prova de carga estática. DAVIS e GUILLERMAIN (1980) ⁸, aplicando a 14 estacas o ensaio vibratório antes da prova de carga, obtiveram a correlação $E' \approx 1,2 E$. Para outras 7 estacas cujos ensaios vibratórios foram posteriores à prova de carga os autores chegaram a $E' \approx 1,8 E$. Anteriormente DAVIS e ROBERTSON (1976) ¹⁰ tinham obtido resultados semelhantes. Correlações desse tipo, entre E' e E , já haviam sido sugeridas por DAVIS e DUNN (1974) ⁷. Tais fatos evidentemente aumentaram o interesse no ensaio vibratório e a sua utilidade, além daquela de com ele se verificar a integridade da estaca.

Como mencionado no item 1 acima tanto um bulbo como uma descontinuidade significativa produzem ressonâncias da mesma forma, o que dificulta as decisões a tomar uma vez que não é necessário se preocupar com o bulbo. No entanto comparando-se a rigidez da estaca defeituosa com a média obtida para outras estacas, do mesmo diâmetro e comprimento em terreno semelhante, é possível identificar o defeito: se for um bulbo a rigidez será

bem acima da média e, se for descontinuidade, bem abaixo. Também se pode avaliar a importância relativa da descontinuidade ou estrangulamento reparando o quanto a rigidez obtida está abaixo da média.

A ocorrência de uma camada muito resistente a um certo nível do fuste causa neste ponto a reflexão das ondas vindas do topo, o que ocasiona ressonâncias correspondentes a essa profundidade. No entanto a observação da rigidez da estaca, que, no caso, se revelará acima da média, não permite que se confunda a ressonância como sendo de uma descontinuidade.

- 4- Os valores teóricos máximo $E'_{\text{máx}}$ e mínimo E'_{min} para a rigidez da estaca no terreno atravessado pela mesma, calculados conforme em DAVIS e DUNN (1974)⁷, a partir da curva de resposta obtida no ensaio. $E'_{\text{máx}}$ é calculado para a estaca no mesmo terreno circundante mas apoiada em base rígida, enquanto E'_{min} corresponderia a nenhum apoio na base. Portanto comparando-se a rigidez E' obtida para a estaca com tais valores pode-se avaliar também desse modo as condições de apoio na base.

No entanto, mesmo para estacas consideradas íntegras, as curvas de resposta ou assinaturas não são como a idealizada da Fig. II.8. Fatores como variações no diâmetro da estaca, qualidade do concreto variando no fuste, uma camada mais resistente atravessada pela estaca e o comprimento da estaca acima do nível do terreno, provocam oscilações adicionais na curva de resposta além daquelas normais, devidas às ressonâncias. Isto pode dificultar, em certo grau, a interpretação dos resultados. Pode-se ter uma idéia dessas interferências consultando curvas de resposta, por exemplo, obtidas por GARDNER e MOSES (1973)¹⁵ e DAVIS e DUNN (1974)⁷

Vantagens do método:

- 1- Não é necessária a preparação prévia da estaca, antes da concretagem. É preciso apenas que o topo seja nivelado aproximadadamente, com argamassa, 24 horas antes do teste. Minutos antes do ensaio o vibrador é fixado com resina de epóxi no centro da cabeça da estaca.
- 2- Além da capacidade de detetar discontinuidades ou defeitos maiores no fuste, o ensaio possui a vantagem de permitir uma estimativa da rigidez estática E do conjunto estaca/solo para baixos níveis de tensão, através da determinação da sua rigidez dinâmica E' .
- 3- O método é bastante rápido: DAVIS e ROBERTSON(1975) ⁹ se referem a uma rotina de ensaio de 15 a 20 estacas/dia, mencionando ainda que em condições ideais já se obteve, ao longo de 2 semanas, um ritmo de 30 a 40 estacas/dia.
- 4- Mesmo quando ocorrem problemas na interpretação da parte da curva de resposta onde se dão as ressonâncias, é sempre possível uma medida da rigidez dinâmica estaca/solo(STAIN,1982) 50 .
- 5- A profundidade de uma discontinuidade percebida pode ser obtida com exatidão razoável.
- 6- A rotina de ensaio não interfere nas demais atividades do canteiro. Logo que foi desenvolvido o ensaio vibratório não podia ser aplicado com a existência de vibrações provenientes de equipamentos da obra, o que em muitos casos significava ensaiar à noite. No entanto tais problemas foram superados com aperfeiçoamentos nos aparelhos do ensaio (DAVIS e ROBERTSON, 1975) ⁹ .
- 7- Os custos do ensaio são moderados (WELTMAN, 1977) ⁵⁹ .

8- O método é amplamente empregado na Europa e nos EUA, tendo há muito ultrapassado a fase experimental.

Desvantagens do método:

- 1- Para um desempenho adequado do ensaio a estaca deve ter seção uniforme ao longo do comprimento (DAVIS e DUNN, 1974)⁷. Portanto, nem todos os tipos de estaca escavada podem ser ensaiados.
- 2- Geralmente não se pode obter informações de trechos da estaca abaixo de um bulbo no fuste (DAVIS e DUNN, 1974)⁷, seja o mesmo intencional ou não, o mesmo ocorrendo para uma descontinuidade significativa. Os pulsos vindos do topo são refletidos por esses defeitos, com as ressonâncias ocorrendo não para o comprimento da estaca mas para um comprimento igual à profundidade da anomalia.
- 3- O ensaio só pode ser realizado em concreto já com resistência satisfatória, após 4 ou mais dias de idade (DAVIS e DUNN, 1974)⁷, para se evitar um amortecimento excessivo das vibrações.
- 4- O equipamento de ensaio é sofisticado e algo volumoso, sendo instalado dentro de um veículo que precisa ter acesso a um ponto que não diste da estaca mais de 30 a 40m.
- 5- A interpretação dos resultados exige pessoa com experiência e conhecimento do ensaio (WELTMAN, 1977)⁵⁹
- 6- Apenas descontinuidades maiores, com boa abrangência da seção, são capazes de refletir adequadamente os pulsos, sendo, portanto, as que são passíveis de detecção. Porém não se pode avaliar adequadamente sua extensão ou gravidade. Também a natureza da descontinuidade observada permanece desconhecida.
- 7- Em condições de terrenos normais ou relativamente resistentes é improvável que se consiga medir o comprimento de estacas com uma relação comprimento/diâmetro excedendo 30:1, embora já se

tenha ensaiado com sucesso estacas com L/D de 50:1, com a base em pedregulho compacto e circundadas por terreno aluvionar siltoso mole (DAVIS e ROBERTSON, 1976)¹⁰ .

2.2.7 - Ensaio de Impacto

Ponderam HIGGS e ROBERTSON(1979)¹⁸ que este método foi um desenvolvimento natural do ensaio vibratório. Na sua aplicação este ensaio é bastante semelhante ao ensaio sísmico. Por sua vez os resultados e interpretação são idênticos aos do ensaio vibratório, com um equipamento mais fácil de manusear e que fornece os resultados mais rapidamente.

Inicialmente um golpe é aplicado a uma célula de carga centrada na cabeça da estaca, a qual mede a força transiente aplicada ao mesmo tempo em que a velocidade do topo da fundação é monitorada por um geofone periférico (Fig. II.4). Um sistema automático por computador analisa os sinais da força e da velocidade em função do tempo, os apresenta no osciloscópio quando aceitáveis e a seguir processa esses dados como na Fig. II.4, de modo a poder oferecer como resultado um gráfico "admitância mecânica versus frequência". Caso neste registro haja ruídos de fundo em demasia, devido a vibrações do canteiro, novos golpes são aplicados e os resultados são processados e somados, de modo a eliminar tal inconveniente no gráfico final. HIGGS e ROBERTSON (1979)¹⁸ reportam que em locais com muitas vibrações geralmente são necessários 4 golpes ou testes, bastando 1 nos lugares calmos.

De resto a curva "admitância mecânica versus frequência" obtida possui o mesmo aspecto e é analisada da mesma forma que no ensaio sísmico.

Os autores acima - que dos consultados foram os que se referiram ao ensaio mais detidamente -, não deram maiores detalhes sobre a teoria do método.

Possuindo o ensaio de impacto características tanto do método sísmico como do vibratório conclui-se que o mesmo apresenta várias vantagens e desvantagens de ambos, as quais, em vista do já explicado sobre esses ensaios, podem ser inferidas com relativa facilidade, e que assim deixam de ser aqui apresentadas.

Encontra-se informações mais recentes do método na "2nd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory on Piles", Stockholm, may 27 to 30, 1984.

2.3 - Métodos com Preparação Prévia da Estaca

2.3.1 - Método Sísmico com Sensores Embutidos

Observam HEARNE et alii(1981)¹⁷ que resultados obtidos por outros autores utilizando o método sísmico com detetores superficiais, aplicado em barras suspensas no ar, modelos e estacas pré-moldadas, foram falsamente encorajadores em relação às estacas escavadas, principalmente as de grande diâmetro. Estas são bem maiores que os modelos e as estacas escavadas pré-moldadas, apresentando comumente uma superfície lateral muito mais rugosa. Conseqüentemente a atenuação das ondas longitudinais é bem mais intensa neste tipo de fundação, tanto devido às maiores dimensões do próprio fuste como e principalmente por causa da absorção de energia na interface rugosa solo-estaca. Além disso a superfície do topo da estaca quando irregular e a presença na mesma de ferros de espera produzem ruídos, isto é, outras vibrações que não as das ondas longitudinais, que podem interferir de modo indesejado no registro destas, confundindo-o.

Tentando contornar os problemas acima e outros já mencionados no item 2.2.5, HEARNE et alii (1981)¹⁷ adotaram o uso de receptores embutidos no fuste (Fig. II.3), em vez do receptor superficial. Embora com a nova técnica os resultados em modelo ainda sejam bem superiores aos obtidos em estacas escavadas, conseguiu-se obter maior sensibilidade e uma melhor localização dos defeitos, mas não sem algum acréscimo de dificuldade na interpretação do ensaio.

O emprego de receptores embutidos permitiu vários benefícios em comparação com o receptor superficial (HEARNE et alii, 1981)¹⁷ : 1-Pode-se medir a velocidade de propagação da onda longitudinal diretamente, no trajeto entre o topo e o(s) receptor(es) ou entre receptores, além do que o receptor mais profundo é capaz de perceber mesmo ondas menos intensas após refletidas na base, que poderiam não ser percebidas no topo pelo receptor superficial; 2- com os receptores embutidos foge-se aos ruídos acima mencionados e às ondas superficiais (item 2.2.5) , que algumas vezes podem impedir a observação da onda refletida tornando o ensaio com sensor na superfície inconclusivo.

O registro obtido através de cada receptor embutido é semelhante ao da Fig.II.5, apenas com o pulso inicial I surgindo mais tardio e sem ser acompanhado das ondas superficiais R, além das ondas refletidas L₁ e L₂ serem agora respectivamente da base e do topo.

Vantagens do método:

- 1- A aplicação do ensaio nas estacas escolhidas é rápida, comparável à da técnica com sensor superficial.
- 2- Com a adoção de sensores embutidos aumenta com certeza a profundidade máxima de efetividade do ensaio sísmico, embora

ainda persista essa limitação (ver item 2.2.5).

- 3- O ensaio pode ser aplicado com pequena interferência nas demais atividades do canteiro.

Desvantagens do método:

- 1- No método sísmico com receptores embutidos, fixados na armadura, é evidentemente imprescindível a preparação prévia da estaca.
- 2- HEARNE et alii(1981) ¹⁷ apontam que, embora já estivessem aplicando o método há 2 anos com bons resultados, a realização e interpretação do ensaio exige pessoal de campo bem treinado e judicioso.
- 3- Torna-se necessário esperar alguns dias a fim de que o concreto adquira uma resistência suficiente para o ensaio.
- 4- Na técnica com sensores embutidos ainda persiste o fato de que apenas as descontinuidades com grande abrangência da seção podem ser registradas.
- 5- Não é possível a localização adequada de um defeito detectado e que se deduza estar acima do receptor superior ou de um receptor único à meia altura do fuste. No entanto estando abaixo apenas um dos receptores a localização do defeito percebido pode ser feita com boa precisão.
- 6- Mesmo com receptores embutidos tanto a extensão como a gravidade dos defeitos não podem ser avaliadas adequadamente, ainda que tenha havido progressos em relação ao uso de sensor na superfície. Isto é, analisa-se a estaca em trechos menores e pode-se medir a atenuação da onda em cada trecho: detectado um defeito a maior ou menor atenuação seria indicativa da maior ou menor gravidade.
- 7- Os receptores embutidos são caros, sendo perdidos a cada ensaio. HEARNE et alii(1981) ¹⁷ se referem a um custo de \$ 40

(quarenta dólares) por receptor. Isto força a utilização de não mais de 2 receptores por estaca e impede a aplicação do ensaio em larga escala na obra.

2.3.2 - Compressão Integral do Fuste

MOON(1972)²⁹ idealizou um meio de se aplicar ao fuste uma carga de compressão, através de cabos ou hastes ancorados na base da estaca e preparados durante a construção, os quais são tensionados por um macaco que reage contra a cabeça da própria estaca, que se torna protendida. A compressão pode ser realizada por meio de cabos que, dentro de bainhas ou tubos presos à armação, vão ao fundo da estaca e voltam à superfície (Fig. II.9a), permitindo que sejam posteriormente recuperados. O mesmo autor, como alternativa, sugere ainda que a compressão seja aplicada à estaca através de hastes ou tirantes recuperáveis, que chegam à base da estaca dentro de dutos e são parafusados em mangas de ancoragem (Fig. II. 9b).

Raciocina MOON(1972)²⁹ que, estando a estaca enfraquecida por algum defeito significativo, um recalque excessivo do topo indicaria uma falha próxima a essa região, enquanto que um grande alongamento do cabo ou hastes, maior do que o que se poderia esperar apenas pelo tracionamento destes, seria indicativo do movimento ascendente da parte inferior da estaca, devido a um defeito relevante próximo à base.

Preconiza o método que, se uma estaca submetida a uma carga superior à de trabalho apresenta um comportamento satisfatório, ainda que tenha defeitos de integridade, ela pode ser aceita, do ponto de vista estrutural.

Vantagens do método:

- 1- O comportamento do fuste é avaliado a níveis reais de tensão.
- 2- Os custos são moderados (mas talvez acima do limite que se pode considerar econômico para aplicação em larga escala no canteiro). MOON(1972)²⁹ estima que o custo da estaca ensaiada aumenta em cerca de 12%.

Desvantagens do método:

- 1- O ensaio exige a preparação prévia da estaca antes da concretagem, com o posicionamento de dutos com cabos ou hastes interiores, presos à armação.
- 2- O método é principalmente qualitativo. De acordo com o exposto acima a interpretação do ensaio pode ser confusa para defeitos importantes mas que ocorram no terço médio da estaca. Também não se pode localizar adequadamente a falha no concreto e nem avaliar a sua extensão ou natureza.

2.3.3 - Sondagem Sônica

O ensaio sônico ou sondagem sônica, desenvolvida no CEPTP, França, se propõe fundamentalmente a verificar a homogeneidade e continuidade do concreto das peças ensaiadas, podendo oferecer dentro de suas limitações uma idéia da extensão dos defeitos. Sob certas condições o ensaio permite ainda a estimativa da velocidade de propagação de ondas sônicas no concreto e portanto uma avaliação da resistência deste, através de uma correlação dos dois parâmetros. Em tempo, é oportuno esclarecer que as ondas sônicas(ou ultrasônicas) nada mais são do que ondas elásticas de compressão.

Para a realização do ensaio são necessários pelo menos 2 tubos longitudinais na estaca, percorrendo-a de preferên

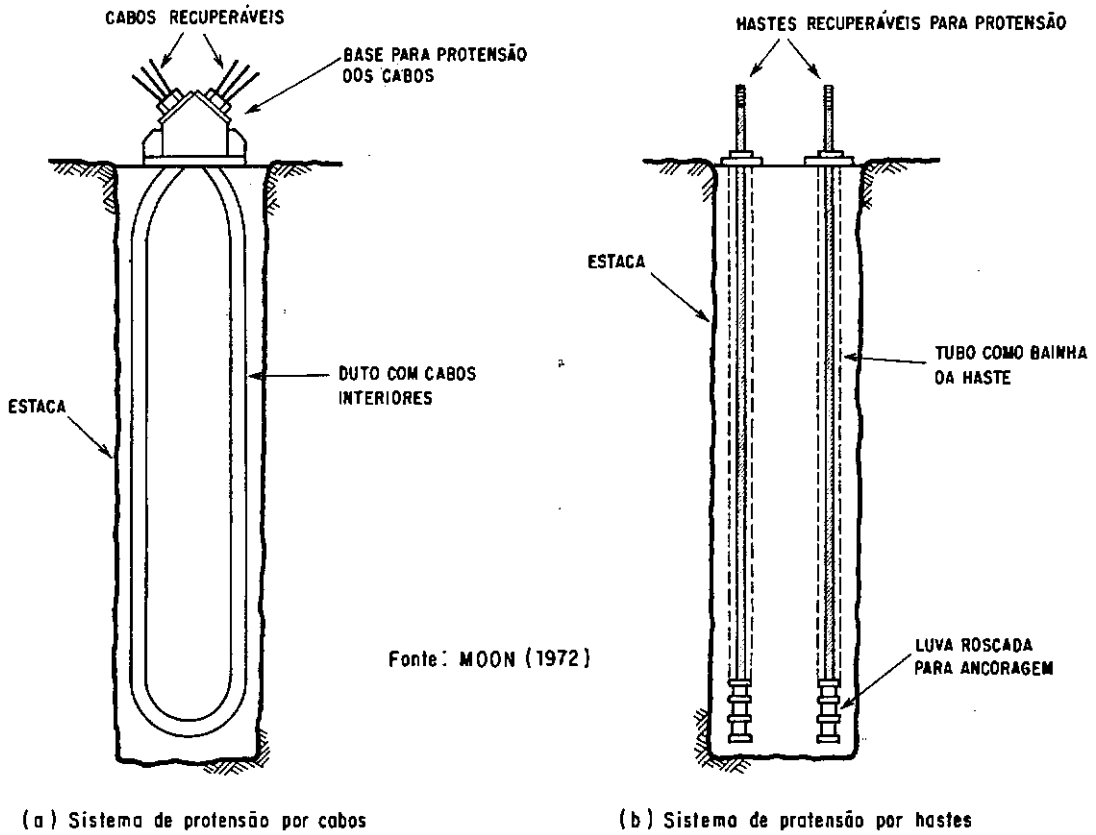


Fig. II.9 - Ensaio de compressão integral do fuste (MOON, 1972).²⁹

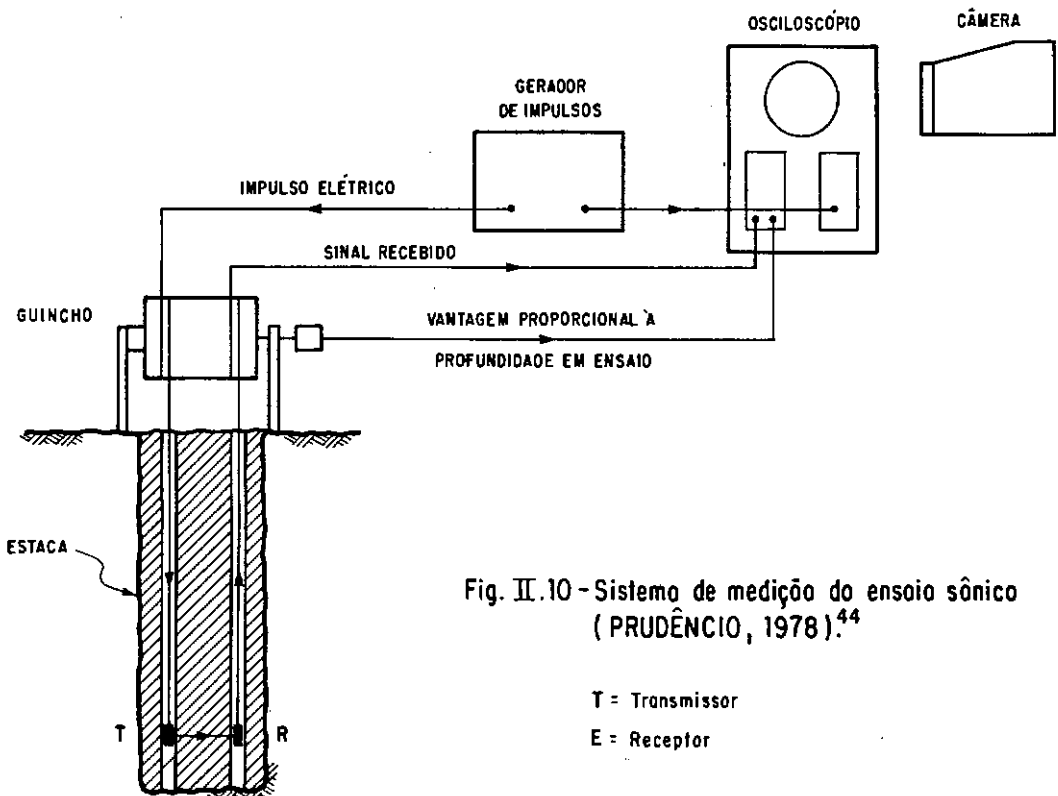


Fig. II.10 - Sistema de medição do ensaio sônico (PRUDÊNCIO, 1978).⁴⁴

cia em todo o comprimento, presos internamente à armação e igualmente espaçados entre si. Um transmissor e um receptor de ondas sônicas, ambos transdutores cerâmicos de 150mm de comprimento e encerrados em invólucro de PVC com 38mm de diâmetro externo (LEVY, 1970)²⁴, são baixados cada um em um dos tubos até o fundo (fig. II.10). Para garantir um acoplamento acústico entre o transmissor e o concreto e entre este e o receptor os tubos são preenchidos com água ou mesmo lama bentonítica (WELTMAN, 1977)⁵⁹. Iniciando o ensaio o transmissor e o receptor são mantidos ao mesmo nível enquanto são guindados até o topo, a uma velocidade constante de cerca de 20cm/s (Fig.II.10). Simultaneamente uma voltagem alternada com pico de 800V (LEVY, 1970)²⁴ é aplicada ao transmissor para produzir no mesmo um efeito piezo - elétrico, originando ondas de choque sônicas que percorrem o concreto e atingem o receptor. Como consequência este gera pulsos de tensão, correspondentes a uma certa profundidade na estaca, os quais são enviados a um osciloscópio na superfície que, em vez de apresentá-los como pulsos (Fig.II.11a), os modula e apresenta na forma de pequenas faixas claras e escuras ao longo do eixo X, correspondendo as partes escuras aos picos de tensão e as claras aos vales (Fig.II.11b). Essa sucessão de faixas escuras e claras, está tão mais à direita na tela do osciloscópio quanto maior é o tempo de propagação da onda entre o emissor e o sensor, sendo o próprio eixo X na tela uma escala de tempo. Esclarecem DAVIS e ROBERTSON(1975)⁹ que a voltagem aplicada ao transmissor tem uma frequência de cerca de 10Hz, sendo gerados, portanto, 10 pulsos sônicos por segundo. Isto, em vista da velocidade de deslocamento dos transdutores na estaca (20cm/s), corresponde a um pulso sônico a cada 2cm de fuste. Na tela do osciloscópio as sucessões de faixas escuras e claras mencionadas, uma para cada

profundidade ensaiada, aparecem superpostas, a profundidade sendo dada no eixo Y da tela, com o que se obtém um perfil de raias ver ti ca is co n t í n u a s, escuras e claras alternadamente, o eixo X dando o tempo t de propagação da onda sônica entre dois tubos em questão (Fig.II.13). Este tempo é contado como a distância na horizontal, da esquerda para a direita, desde o início do registro (emissão do pulso sônico) até o começo da primeira raia, escura (recepção do pulso), Fig.II.13. Todo esse perfil, à medida que vai sendo construído na tela pelas medidas sucessivas, é captado em uma câmera Polaroid, produzindo-se um registro permanente chamado de diagra fia, pronto para análise já ao fim do ensaio. VOLD e HOPE(1978)⁵⁸ apresentaram um equipamento de ensaio no qual, alternativamente, o registro é obtido de forma gráfica e não fotográfica, através de um plotador automático.

A Fig.II.12 apresenta duas disposições típicas de tubos de acesso na seção de uma estaca, para 3 e 4 tubos respectivamente, dispostos nos vértices de um triângulo equilátero e um quadrado. As setas entre tubos indicam os diversos percursos a serem ensaiados em cada disposição, com o seu sentido orientado do emissor para o sensor. Assim, em uma estaca contínua e de concreto homogêneo, a diagra fia, para cada par de tubos, é dada por uma sucessão regular de raias ver ti ca is ne gr as e br an cas. Ao contrário, nos locais de ocorrência de descontinuidades as raias tem o seu padrão perturbado, com as mesmas se deslocando bruscamente para a direita em razão do aumento do tempo de percurso das ondas sônicas entre dois tubos (Fig.II.13, defeito tipo 1). Percebe-se logo que, por estaca, os registros ou perfis possíveis são em número igual ao de pares de tubos.

Defeitos no fuste, caracterizados por concreto poroso ou intrusão de material indesejado, ao abrangerem o concreto no percurso entre dois tubos provocam um aumento no tempo de

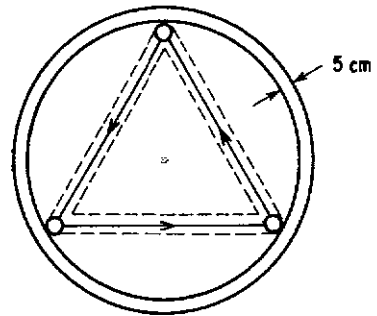
a) Sinal modulado em amplitude (pulso).



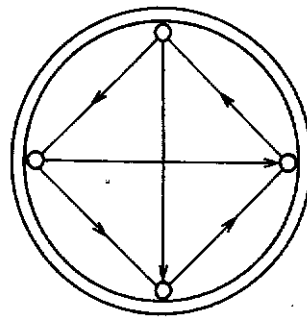
b) Sinal modulado em intensidade (diagrafia).

Fig. II.11 - Representação das ondas sônicas (WELTMAN, 1977)⁵⁹

ESTACA Ø 1m (E = 1/25)

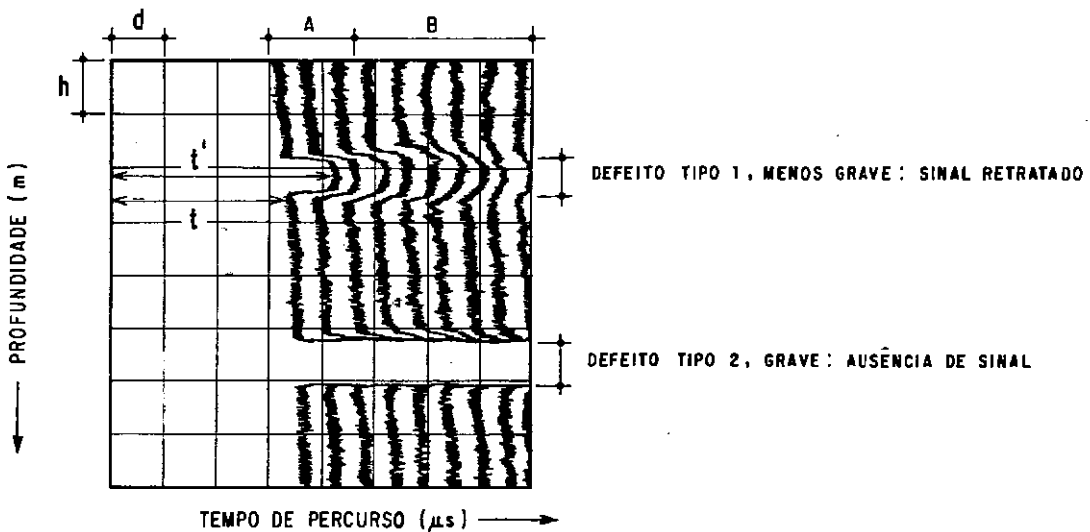


a) 3 tubos de acesso na seção



b) 4 tubos de acesso na seção

Fig. II.12 - Percursos (setas) entre tubos das ondas sônicas na seção da estaca.



A - Primeiros impulsos sonoros, consideradas na interpretação.

B - Reflexões e superposições da ultra-som.

t, t' - Tempo de percurso do ultra-som entre emissor e sensor. A verticalidade dos raios indica o paralelismo dos tubos.

d - Escala de tempo: 100 a 200 µs conforme ajuste do osciloscópio.

h - Escala de profundidade no fuste: 2 m.

Fig. II.13 - Ensaio sônico: Diagrafia de uma estaca com defeitos. (Adaptado de PRUDÊNCIO, 1978)^{44/45}

propagação, o que acarreta uma diminuição de velocidade das ondas sônicas caracterizando um defeito nessa profundidade. Quanto mais grave é o defeito mais as suas propriedades elásticas se afastam das do concreto íntegro e maior é o tempo de propagação, com um deslocamento localizado das raiais para a direita - defeito tipo 1 na Fig.II.13 -, podendo-se chegar nos defeitos importantes até à ausência total das raiais no trecho - defeito tipo 2 na Fig.II.13. Este é o raciocínio seguido por MARCEL(1979)²⁷ para avaliar os defeitos percebidos, além de observar a sua extensão no perfil. Já a abrangência da anomalia na seção pode ser avaliada pelo número de percursos afetados à mesma profundidade. No caso de anomalia do tipo 1, Fig.II.13, correspondente a sinal amortecido, o mesmo autor aconselha uma estimativa, ainda que apenas aproximada, da resistência do concreto, feita através de uma correlação "resistência à compressão x velocidade de propagação". Nessas correlações a resistência é fortemente dependente da velocidade, variando bastante com esta. Portanto, devido ao desconhecimento da real distância entre tubos e aos erros na determinação do tempo de propagação, por falta de uma melhor definição dos sinais(raiais verticais) na diagrafia, ocorrem erros na velocidade determinada e,consequentemente,erros bastante significativos na estimativa da resistência, não se podendo considerá-la muito confiável. Não obstante, através do tempo de propagação do sinal retardado pela anomalia, t' , e de um tempo normal de propagação t (Fig.II.13), pode-se avaliar a diminuição na velocidade de propagação para uma distância entre tubos assumida (PRUDÊNCIO, 1978)⁴⁵ e, por uma correlação, a redução na resistência, guardadas as advertências acima. Como mostra a Fig.II.13 a profundidade em que se torna t deve ser a mais próxima possível da anomalia, para minimizar diferenças nos tempos de propagação de-

vidas a um possível afastamento ou aproximação dos tubos.

Em se tratando de uma anomalia grave, do tipo 2 na Fig.II.13, a ausência de sinal evidentemente impede qualquer avaliação da resistência.

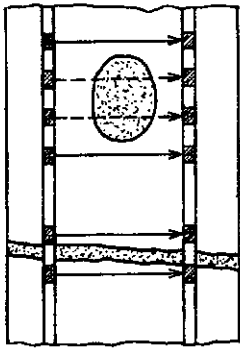
Há um método eletromagnético de medição da distância entre dois tubos, mas que só dá resultados para tubos de PVC ou metais não magnéticos. No entanto o processo é caro e só se justifica em casos especiais.

O ensaio sônico permite o uso de tubos de acesso de PVC ou metálicos (ferro galvanizado, aço, etc). Os tubos metálicos apresentam boa aderência ao concreto mas causam um registro de sinais menos definidos, o que não ocorre para os tubos de PVC. Estes, por outro lado, exigem tratamento de suas paredes externas para que apresentem boa aderência ao concreto, sem o que ocorrem anomalias nas diagrfias. DAVIS e ROBERTSON (1975)⁹ dão, em função do diâmetro da estaca, o número de tubos geralmente empregado: para diâmetros abaixo de 35cm, 2 tubos; de 35 a 80cm de diâmetro, 3 tubos e, para diâmetros acima de 80cm, 4 tubos.

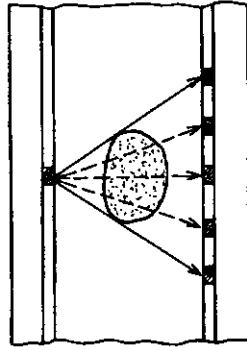
A velocidade do som em concreto íntegro está por volta de 4.000m/s, caindo rapidamente no concreto poroso, pedregulho, areia, argila, etc, para a faixa de 2.000 - 3.000m/s. Desse modo, raciocinam DAVIS e ROBERTSON (1975)⁹, a presença desses materiais no fuste pode ser facilmente percebida na sondagem sônica. Ocorre, porém, que nesse método o ensaio do concreto entre dois tubos é basicamente direcional, ao longo do percurso das ondas sônicas entre dois tubos e numa faixa da largura aproximada desses tubos (Fig.II.12a). Com isto, não se pode detetar satisfatoriamente defeitos que se afastem algo da reta que une o emissor e receptor, Fig.II.12. Como mostram ensaios realizados por

BOBROWSKI et alii (1970)⁵, em uma estaca com defeitos simulados e percorrida por 3 tubos de acesso, defeitos centrais no fuste, mesmo significativos mas apenas tangenciando o percurso entre tubos de acesso, podem não ser devidamente acusados no teste. Isso exige, nas estacas de grande diâmetro, a adoção de pelo menos 4 tubos para uma verificação satisfatória. No entanto, deve-se notar que, pela própria gênese dos defeitos nas estacas escavadas, é pouco provável a ocorrência de anomalias significativas apenas centrais, que não cheguem a se interpor entre os tubos. Tanto é que, segundo reportam DAVIS e ROBERTSON(1975)⁹, quando se emprega 4 tubos na estaca o usual é primeiro se ensaiar os pares de tubos periféricos, só se efetuando as duas verificações em diagonal (Fig.II.12b) quando na 1ª etapa se encontra algum defeito significativo. Adicionalmente, ao se constatar um defeito pode-se tentar avaliá-lo melhor ensaiando com os transdutores a diferentes cotas, como indica a Fig.II.14.

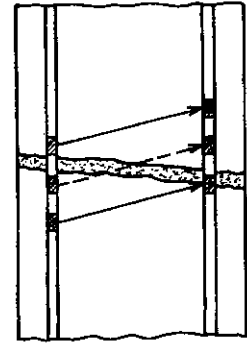
Uma alternativa à técnica acima descrita é realizar o ensaio sônico com uma sonda única (Fig.II.15), com o emissor e o sensor em um mesmo invólucro mas separados por um isolador acústico. A sonda ensaia radialmente ao redor do tubo de acesso, podendo também ser aplicada em perfurações por sondagem rotativa na estaca. Verifica o concreto até uma profundidade de aproximadamente 10cm (WHITAKER,1974)⁶⁰. Na literatura consultada não há menção a respeito do aparelho ser capaz de registrar uma falta de cobrimento da armação, o que no entanto parece possível. WELTMAN(1977)⁵⁹ se refere à sonda como tendo cerca de 2m de comprimento e 55mm de diâmetro, com a distância entre transdutores podendo ser variada de 30cm até 2m, correspondendo à menor distância a melhor resolução vertical - 5cm. Isto é, defeitos com dimensão vertical abaixo da citada não são percebidos. No entanto



(a) - Sondagem horizontal. Uma camada pouco espessa pode não ser percebida.



(b) - Sondagem oblíqua para avaliação de defeitos.



(c) - Sondagem oblíqua para detectar camadas pouco espessas.

Fig. II.14 - Manobras para melhor avaliação de defeitos (Adaptado de PRUDÊNCIO, 1978).⁴⁴

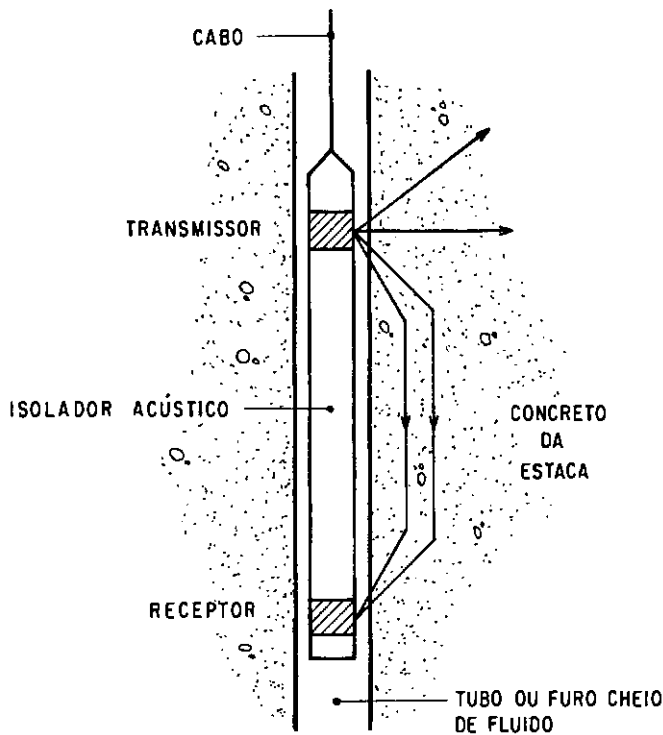


Fig. II.15 - Sonda para ensaio sônico (WELTMAN, 1977).⁵⁹

o autor não esclareceu se a resolução conforme definida é válida também para defeitos localizados ou apenas para aqueles que circundam todo o tubo (camadas, etc). Em relação à técnica precedente a desvantagem é que a sonda ensaia apenas uma pequena área ao redor dos tubos, o que não se justifica perante a existência do ensaio com transdutores em tubos separados. Adicionalmente, a execução de 1 ou mais furos por rotativa para a aplicação do ensaio é uma prática bastante cara. Por isso, atualmente o ensaio sônico com a sonda tem sido relegado a segundo plano. Em tempo, os resultados são apresentados da mesma forma que na técnica precedente.

Vantagens do método (emissor e sensor em tubos separados):

- 1- Pode-se ensaiar estacas escavadas de qualquer forma e diâmetro, barragens e paredes moldadas no solo, com a possibilidade de se verificar concreto de espessura de até 2,5m (PRUDÊNCIO, 1978)^{44/45}. O terreno circundante não tem nenhum efeito prejudicial no ensaio.
- 2- O método tem sido bastante empregado na Europa, principalmente em estacas escavadas de grande diâmetro e barretes, ganhando confiabilidade nos últimos 15 anos pelo bom desempenho na detecção de defeitos.
- 3- Grande parte da seção da estaca pode ser verificada pela adoção de um número suficiente de tubos de acesso. Com 4 tubos grandes seções já podem ser inspecionadas satisfatoriamente. Isto, não porque a área efetivamente ensaiada seja grande, mas sim porque com esse número de tubos é pouco provável que um defeito comprometedor possua geometria tão caprichosa que consiga evitar todos os percursos entre tubos.

- 4- O método possui boa sensibilidade aos defeitos usuais em estacas escavadas, principalmente aos defeitos comprometedores, como se pode deduzir dos ensaios de BOBROWSKI et alii (1970)⁵ e LEVY (1970)²⁴, conduzidos em estacas de teste com defeitos simulados.
- 5- Praticamente não há limitação de profundidade para o ensaio, uma vez que há equipamentos capazes de operar a cerca de 50m (VOLD e HOPE, 1978)⁵⁸ ou mesmo mais.
- 6- Um defeito percebido é localizado em profundidade com boa precisão.
- 7- O método é rápido: WELTMAN (1977)⁵⁹ se refere a uma velocidade de ensaio de 500 a 1000 m de tubo por dia. Isto, para estacas de 20 m, significa o ensaio de 8 a 16 estacas/dia com 3 tubos/estaca, e de 4 a 8 estacas/dia quando se utiliza 4 tubos/estaca (jornada de trabalho de 8 horas).
- 8- É possível sondar todo o comprimento da fundação, com a verificação do concreto praticamente até a base da peça. Adicionalmente, através de perfurações que se prolonguem a partir do fundo dos tubos pode-se verificar o contato da ponta com o material subjacente (VOLD e HOPE, 1978)⁵⁸.
- 9- Como lembra WELTMAN (1977)⁵⁹ o método é adequado para se ensaiar estacas escavadas com arrasamento abaixo da superfície. PICCOLI (1978)³⁵, em estacas escavadas de viadutos da Rodovia dos Bandeirantes (Via-Norte) em São Paulo, relata o prolongamento dos tubos de acesso até acima dos blocos de coroamento, permitindo o ensaio também em qualquer época posterior, uma vez que foi resguardado o acesso aos tubos.
- 10- Nas cotas dos defeitos percebidos considerados graves (ausência de sinal), quando os tubos empregados são de PVC pode-se romper suas paredes através de haste especial acionada com

movimentos de rotação, permitindo então que através dos próprios tubos se aplique injeções de reforço, seja a anomalia na base ou no fuste.

- 11- O ensaio é realizado com interferências mínimas nas atividades do canteiro.

Desvantagens do método (emissor e sensor em tubos separados):

- 1- O método necessita da preparação prévia da estaca, antes da concretagem, com a previsão de tubos presos internamente à armação.
- 2- Para a realização do ensaio é necessário esperar até que o concreto endureça suficientemente, de modo a não haver um amortecimento prejudicial das ondas sônicas. Segundo VOLD e HOPE (1978)⁵⁸ pode-se ensaiar o concreto a partir de 3 a 7 dias de idade. No entanto, PRUDÊNCIO (1978)^{44/45} apresentou diagrfias em concreto de 5 dias obtidas com má definição dos sinais, sendo a causa apontada pelo autor a pouca idade do concreto.
- 3- À medida que o diâmetro da estaca aumenta é necessário elevar o número de tubos de acesso para que se consiga uma verificação adequada da seção. Tal é devido ao fato de que o ensaio só testa o concreto no percurso entre tubos e numa faixa de largura aproximadamente igual ao diâmetro dos mesmos.
- 4- O ensaio não é capaz de indicar como um defeito encontrado afetará o comportamento da estaca.
- 5- Aponta WHITAKER (1974)⁶⁰ que defeitos com pequena dimensão vertical (menos de 7,5 cm) podem às vezes passar despercebidos ou serem minorados, o que é indesejável em se tratando de

juntas frias ou outras anomalias em forma de camada. Neste caso esse inconveniente pode ser contornado ensaiando-se a esta-
ca sempre com o transmissor e o receptor a profundidades dife-
rindo de, por exemplo, 10 cm.(Fig.II.14c).

- 6- Apesar da possibilidade do cálculo da velocidade de propaga-
ção do som no fuste, e de poder correlacioná-la à resistência
do concreto, pondera PRUDÊNCIO (1978)^{44/45} que o ensaio identi-
fica mais adequadamente a continuidade do concreto do que suas
propriedades mecânicas.
- 7- Quando se decide ensaiar uma peça concretada sem os tubos de
acesso inclusos, lembra PRUDÊNCIO (1978)^{44/45} que é necessária
a execução de furos no concreto com sondagem rotativa, corren-
do-se então o risco do corte da armação devido à dificuldade
de se manter a verticalidade de tais furos. Além disso, essa
alternativa encarece bastante a sondagem sônica.
- 8- Os custos do ensaio utilizando-se tubos de acesso de metal
são altos. Com tubos de PVC e para as condições brasileiras
do momento os custos caem aproximadamente para a metade, sen-
do ainda assim algo elevados.
- 9- Não se pode com o método verificar o cobrimento da armação.
- 10- Nas seções com uma maior densidade de armação os tubos de a-
cesso podem contribuir para "engaiolar" o concreto entre os
ferros, dificultando o cobrimento destes.
- 11- Para a correta avaliação de uma diagrafia e uma mais comple-
ta exploração das informações nela contidas, considera LEVY
(1970)²⁴ que é necessária uma pessoa com experiência e conhe-
cimento do ensaio. No entanto, como a diagrafia é dada na for-
ma de um perfil os defeitos importantes podem ser percebidos
com facilidade.

2.3.4 - Sondagem Gama por Retrodispersão

2.3.4.1 - Introdução

Pode-se ter uma idéia bastante clara da integridade de uma estaca escavada através da medida da densidade do concreto ao longo do seu fuste, e é a isto que se propõe a sondagem gama. Conforme a técnica este método pode utilizar a transmissão ou a dispersão da radiação gama ao atravessar a matéria.

A sondagem gama por transmissão necessita de pelo menos dois tubos verticais e paralelos ao longo do fuste, como na Fig.II.18. A fonte radioativa e o detetor são pontos em duas pequenas sondas diferentes, baixadas cada uma em um dos tubos e mantidas ao mesmo nível. Os raios gama ao atravessarem o concreto em direção ao detetor são absorvidos em sua maior parte, havendo no entanto uma pequena parcela que atinge o detetor na unidade de tempo - a taxa de contagem r . Esta parcela, através de uma curva de calibração, dá a medida da densidade do material atravessado, através da qual se conclui a respeito da presença ou não de concreto íntegro no fuste. Na curva de calibração a taxa de contagem é tão maior quanto menor é a densidade, como que um aumento brusco e ao longo de certo trecho do tubo de acesso configura um defeito. No entanto a sondagem gama por transmissão, após algumas tentativas (PREISS, 1971)⁴¹, acabou relegada a segundo plano, devido a se necessitar, para distâncias entre tubos maiores de 60 cm, de uma fonte muito intensa e, portanto, de medidas de segurança que dificultariam bastante a realização do ensaio. Adicionalmente, para se manter uma distância máxima de 60 cm entre tubos seria necessário um número elevado deles, aumentando consideravelmente os

custos do ensaio nas estacas de grande diâmetro.

Devido aos problemas acima mencionados decidiu-se desenvolver a sondagem gama por retrodispersão, realizada através de uma sonda única contendo ao mesmo tempo a fonte e o detetor, ambos separados na vertical por uma blindagem de chumbo (PREISS e CAISERMAN, 1975)⁴². Sendo este o método em avaliação nesta pesquisa passa-se então a descrevê-lo nos itens e capítulos seguintes, inclusive com base em ensaios realizados com o protótipo de uma sonda, projetada na COPPE-UFRJ para os propósitos deste trabalho.

2.3.4.2 - Princípios Básicos do Método

A sonda radioativa, ou densímetro de dispersão gama do tipo de profundidade, possui o arranjo e componentes básicos indicados na Fig.II.16.

Para a medição da densidade do concreto em fundações profundas (estacas escavadas e paredes moldadas no solo) a sonda é introduzida em tubos de acesso presos à armadura ao longo de toda a penetração do elemento estrutural no terreno (Fig.II.18). A concretagem é feita tão rapidamente quanto possível, em seguida ao posicionamento da armadura com os tubos no buraco escavado.

O método utiliza o fenômeno chamado efeito Compton (item 3.1.2), que consiste na dispersão ou deflexão dos fótons de radiação gama ao se chocarem com os elétrons presentes no material sobre o qual incidem. A cada deflexão os fótons incidentes perdem parte de sua energia (item 3.1.2) e mudam de direção em suas trajetórias que, por isso mesmo, são sempre irregulares e imprevisíveis. Devido a essas deflexões par

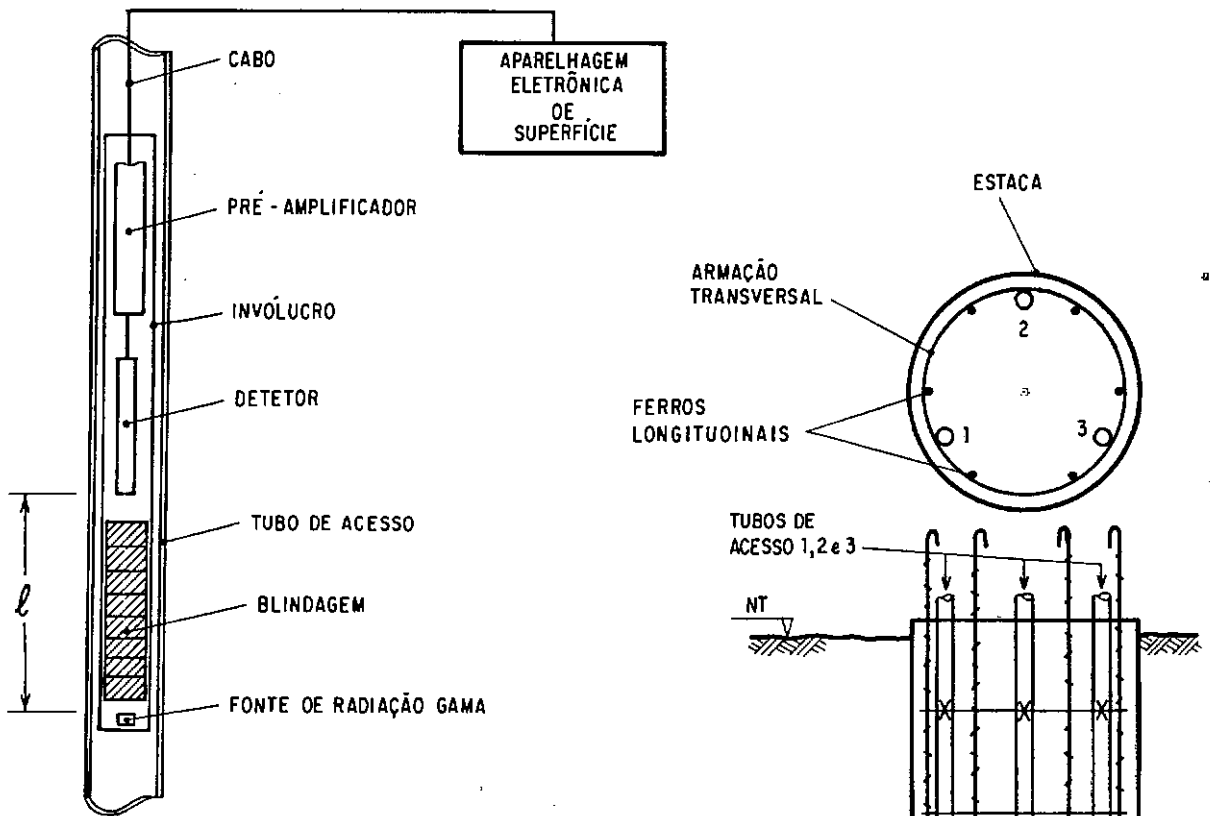


Fig. II.16 - Componentes de uma sonda para sondagem gama.
(PREISS et alia, 1975)⁴²

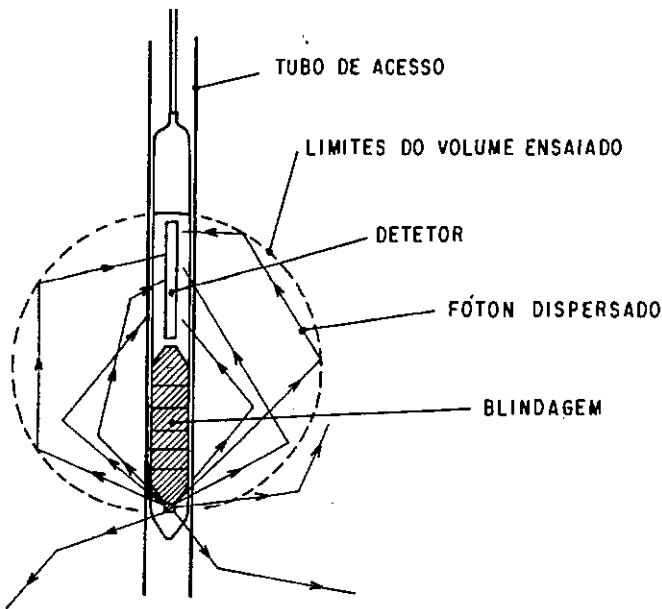


Fig. II.17 - O volume ensaiado pelo sonda ao redor do tubo de acesso
(PLATA, 1972)³⁷

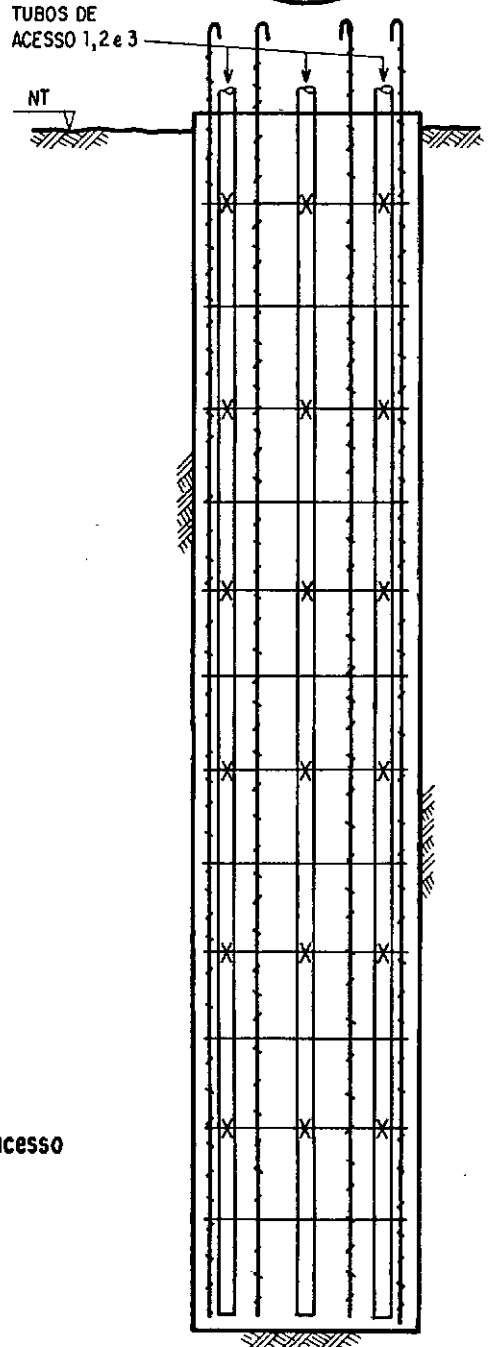


Fig. II.18 - Tubos de acesso numa estaca escavada, presos internamente à armação.

te dos fótons emitidos pela fonte, após uma ou mais colisões, vai atingir o detetor (Fig.II.17). Os fótons dispersados (defletidos) mas que devido à sua trajetória não alcançam o detetor são absorvidos pelo concreto e meio circundante.

O número n de flóton registrados num intervalo de tempo t fornece a chamada taxa de contagem $r=n/t$ que, para uma determinada sonda, depende principalmente da densidade do material ensaiado. É dada geralmente em contagens por minuto (c.p.m.). A taxa de contagem pode então ser relacionada matematicamente e graficamente com a densidade do material no qual foi obtida, através da chamada curva de calibração da sonda (Fig.II.19). Esta é construída plotando-se em escala que geralmente é a aritmética taxa de contagem (r) versus densidade (ρ). Tal curva é, portanto, a resposta do aparelho a uma certa gama de variação de densidades.

A curva de calibração de uma sonda radioativa para a medida de densidade tem o aspecto típico indicado na Fig.II.19, sendo que para a faixa de densidades do concreto, em torno de $2,4\text{g/cm}^3$, sua inclinação é nitidamente negativa ($dr/d\rho < 0$). Ou seja, no ramo descendente da curva a taxa de contagem aumenta à medida que o peso específico diminui. Isto significa que havendo um incremento brusco da taxa de contagem o mesmo é devido à presença no fuste de material de densidade significativamente menor que a do concreto. Fica então configurada numa falha nesse material, que pode ser um vazio, concreto muito poroso, a presença de material indesejado no concreto, etc.

Na verdade a curva de calibração de uma dessas sondas deve ser escolhida por critérios racionais dentre as inúmeras curvas de resposta "taxa de contagem versus densida-

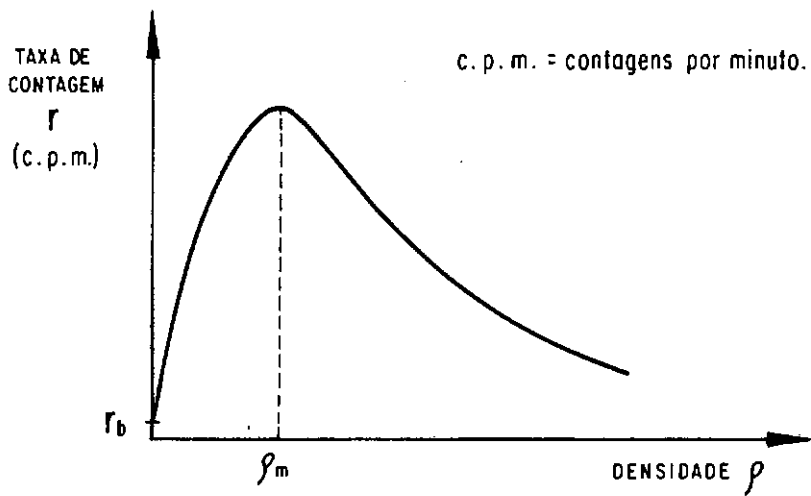


Fig. II.19 - Aspecto típico da curva de calibração de uma sonda.

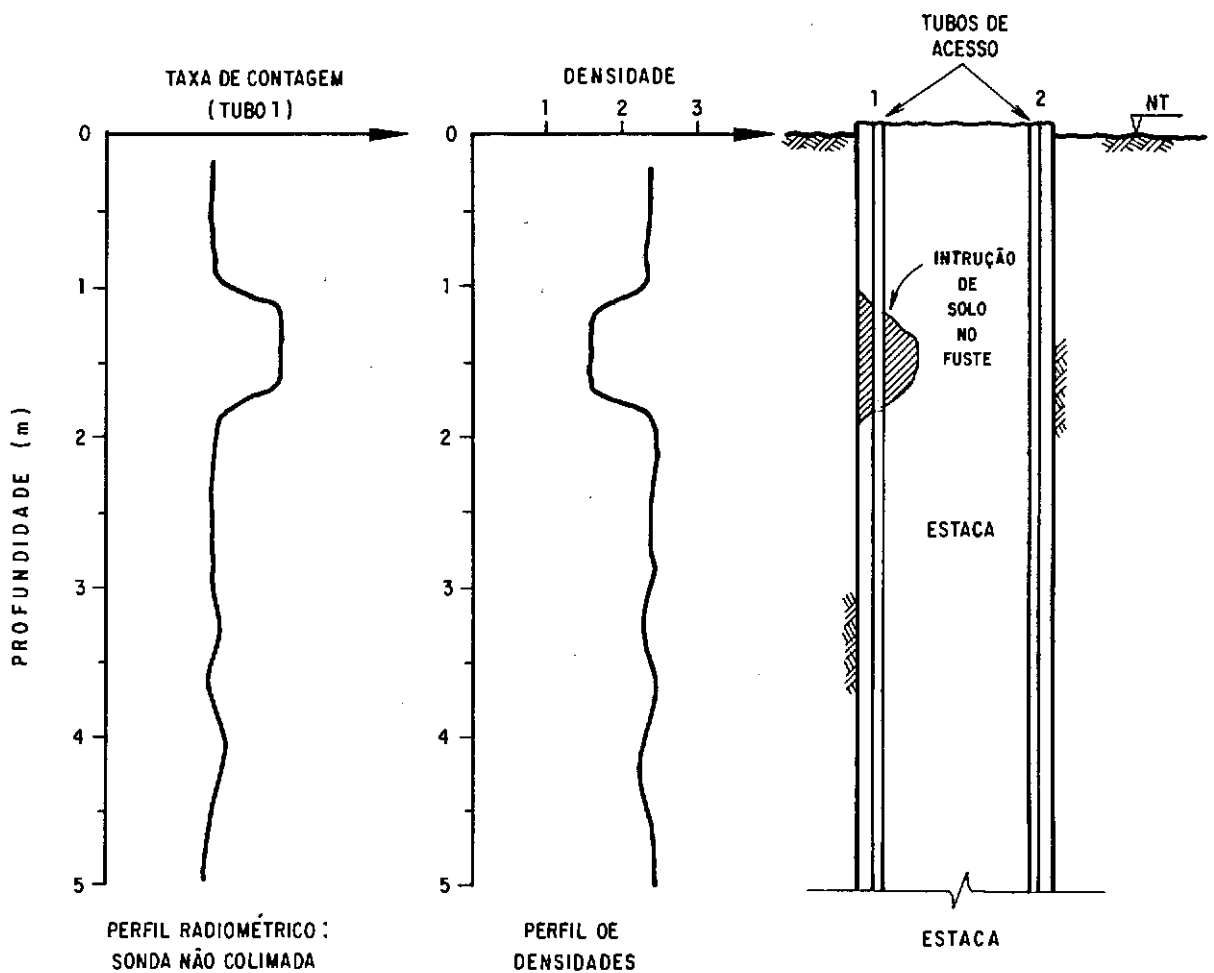


Fig. II.20 - Resultado de sondagem gama com uma sonda não colimada.

de" possíveis para esse tipo de aparelho. Fundamentalmente, a cada distância l entre a fonte radioativa e o detetor (Fig.II.16) vai corresponder uma curva de resposta. Analisando-se convenientemente essas curvas pode-se decidir qual delas deve ser a de calibração da sonda. A distância fonte-detetor correspondente é chamada de distância ótima fonte-detetor - DOFT. O critério de análise das curvas de resposta está estudado no item 6.5.1.

O volume de concreto ensaiado ao redor do tubo de acesso (Fig.II.17) é chamado na literatura técnica de volume de influência da sonda. É o volume de material do qual se pode medir efetivamente a densidade. Possui aproximadamente a forma de uma esfera ou de um elipsóide. No item 3.2 suas principais características são analisadas convenientemente.

2.3.4.3 - Componentes da Sonda

2.3.4.3a- Introdução

Uma sonda radioativa clássica é a que consta dos componentes mostrados na Fig.II.16. É, em essência, o aparelho que tem sido utilizado por vários pesquisadores tanto na medida do peso específico de solos e rochas (PLATA, 1972)³⁷ como de concreto em estacas escavadas e paredes moldadas no solo (PREISS e CAISERMAN, 1975; PREISS et alii, 1978)^{42/43}.

Parte dos fótons emitidos pela fonte, após uma ou mais colisões com os elétrons do material ensaiado, chega ao detetor (Fig.II.17) gerando impulsos elétricos. Estes impulsos, expressos em volts (V), são conduzidos por um cabo até a superfície onde, após amplificados ou não, são registrados por equipamento eletrônico adequado (Fig.II.16). Cada impulso elétrico re

gistrado corresponde a um fóton gama (um raio gama).

O registro da radiação pode ser feito com muitas vantagens por um scaler, como no caso desta pesquisa. Esse aparelho é em geral bastante compacto: é plenamente portátil e serve tanto de fonte de alta tensão para o detetor como de contador da radiação. Para desempenhar esta última função o scaler possui um cronômetro de elevada acurácia, que é acionado simultaneamente ao início da contagem e a suspende ao final do tempo de observação t . Se ao final deste foram registrados n fótons diz-se em geral que foram obtidas n contagens, o que resulta em uma taxa de contagem $r = n/t$. As características relevantes do scaler neste trabalho estão no item 5.3.

2.3.4.3b- O Detetor

Nas sondas radioativas do tipo em estudo os pesquisadores tem usado com sucesso tanto detetores de cintilação como os Geiger-Müller (G-M).

MAFRA(1973) ²⁶ explica que se define a eficiência de um detetor como a probabilidade de uma partícula ou fóton ser detetado. Para a radiação gama um detetor G-M possui eficiência da ordem de 1%, que depende da energia do fóton. Já o detetor cintilador, para a mesma radiação, possui uma eficiência de 10 a 100 vezes maior (OLDENBERG e RASMUSSEN, 1966)³¹. Essa diferença reside principalmente no fato de que, nos detetores G-M, o volume sensível à radiação consiste de um gás apropriado a baixa pressão (~ 10 cm de Hg), enquanto que nos cintiladores usados em sondas tal volume é feito de um cristal fluorescente, muito mais denso que o gás. Há, portanto, uma propabilidade bem maior da ra-

dição interagir com o cristal do que com o gás. Seja qual for o tipo de detetor a radiação é percebida através das consequências da sua interação com o material contido no volume sensível. No caso dos cintiladores, o cristal ao ser atingido por um fóton gama emite luz (cintila), a qual é percebida através de uma válvula fotomultiplicadora muito sensível. Esta transforma a luz em um pulso de tensão que, após amplificado, é registrado, por exemplo, em um scaler. O pulso é diretamente proporcional à energia que o fóton perde no cristal, o que permite que tal energia seja medida se desejado. O detetor cintilador exige um pré-amplificador junto à válvula fotomultiplicadora, que por sua vez está em contato íntimo com o cristal para que possa perceber as cintilações. Todo esse conjunto, portanto, é interior à sonda. Apesar de muito eficiente é, no entanto, mais caro, bastante sensível a variações da alta tensão que necessita e, ainda, mais frágil que um detetor G-M. Montou-se para ser empregado nesta pesquisa um detetor de cintilação, que funcionou muito bem nos testes mas se danificou ao início dos ensaios e resistiu bravamente às tentativas de reparo. Assim sendo não foi possível utilizá-lo e compa - rar os seus resultados com os obtidos pelo detetor G-M, o que era intenção original deste trabalho.

Um esquema de um detetor G-M, como o que foi empregado nos ensaios, pode ser visto na Fig.II.21. Consiste de uma câmara metálica ou de vidro metalizado, preenchida com gás adequado a baixa pressão e atravessada ao comprimento por um fio condutor, isolado da câmara. Uma diferença de potencial é apli - cada entre ambos, através da resistência R, por uma fonte de ten - são contínua V (Fig.II.21), o que cria um campo elétrico no gás orientado no sentido do fio para a câmara. Um raio ionizante ao atingir o gás produz pares de íons.. Os elétrons arrancados dos

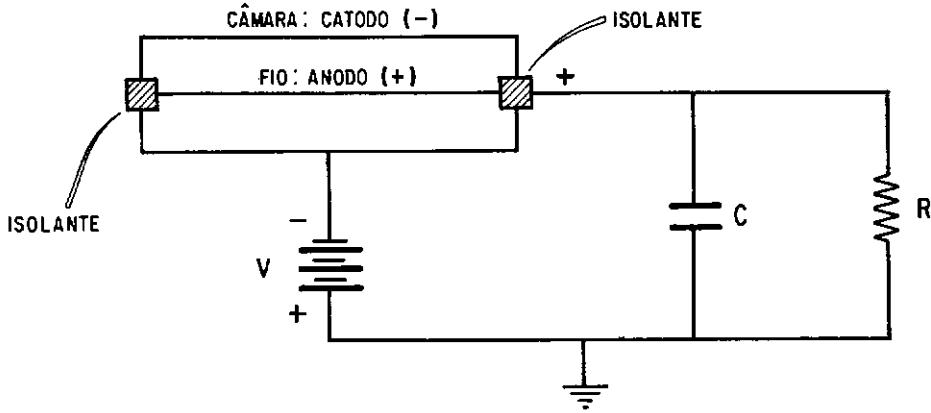


Fig. II.21 - Esquema de um detector Geiger - Müller e circuito associada: V = fonte de alto tensão
C = capacitor, R = resistência. (Fonte: IPR, 1968)²¹

Fig. II.22 - Curva característica de um detector Geiger - Müller. V_0 é a tensão média do patamar.

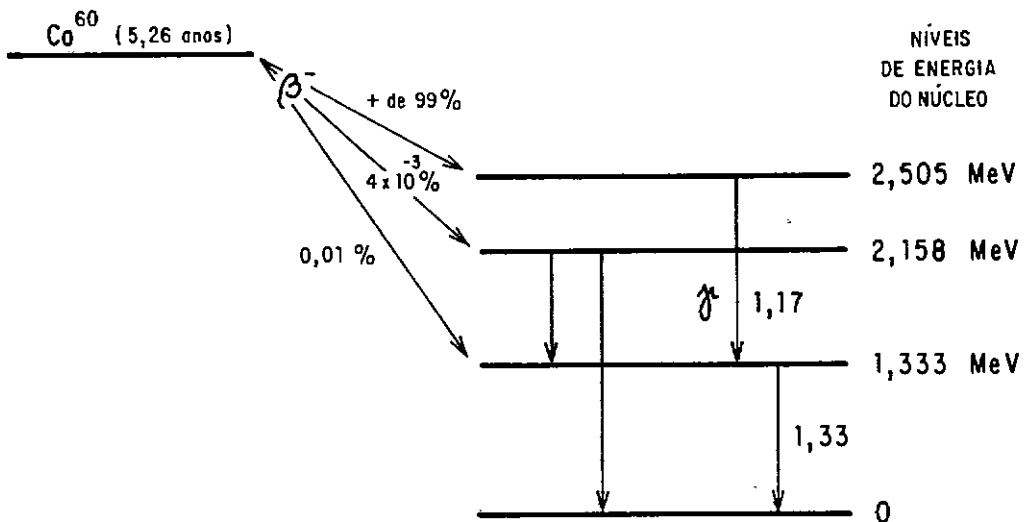
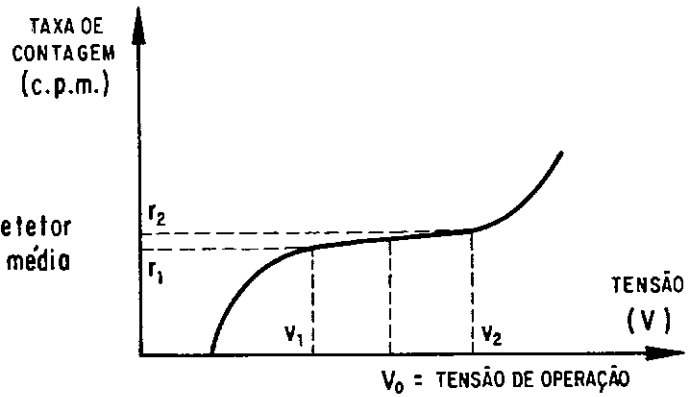


Fig. II.23 - Esquema de desintegração do Co^{60} , emissor de radiação beta (β^-) e gama (γ).
Adoptado de IPR (1968)²¹

átomos na incidência do raio são ditos primários. Devido ao campo elétrico existente entre os eletrodos os íons positivos se enca - minham para o catodo (-) e os íons negativos para o anodo (+). Os elétrons primários acelerados pelo campo elétrico adquirem ener - gia suficiente para causarem mais ionizações e, portanto, mais e - létrons, que por sua vez vão repetir o processo. É a chamada ioni - zação secundária ou multiplicação pelo gás. Nos tubos G-M a dife - rença de potencial entre os eletrodos é suficiente para que a multiplicação se espalhe por todo o gás, caracterizando o que se chama de uma descarga ou avalanche. A cada raio corresponde uma avalanche, cujos íons são coletados pelos eletrodos. Com isto o capacitor C adquire uma carga correspondente e produz um pulso de tensão, que é registrado no scaler. Nos detetores G-M, por cau - sa do processo de avalanche, a magnitude ou altura dos pulsos ge - rados é sempre a mesma, não dependendo da energia da radiação io - nizante ou de sua natureza. Os pulsos são da ordem de 1 volt (IPR - UFMG, 1968)²¹ .

Para a utilização adequada do detetor é necessário a determinação da sua curva característica, que confi - gura a dependência da taxa de contagem em relação à tensão (Fig. II.22), para uma mesma situação de ensaio. Essa curva possui um trecho de pequena inclinação, à semelhança de um patamar, em cuja tensão média V_0 se deve operar o detetor para garantir que flutu - ações imprevistas da tensão influam pouco na taxa de contagem.

Maiores informações do detetor G-M utili - zado nos ensaios são encontrados no item 5.4.6.

2.3.4.3c- A Blindagem. Colimadores

Nas Fig's II.16 e II.17 pode-se ver a

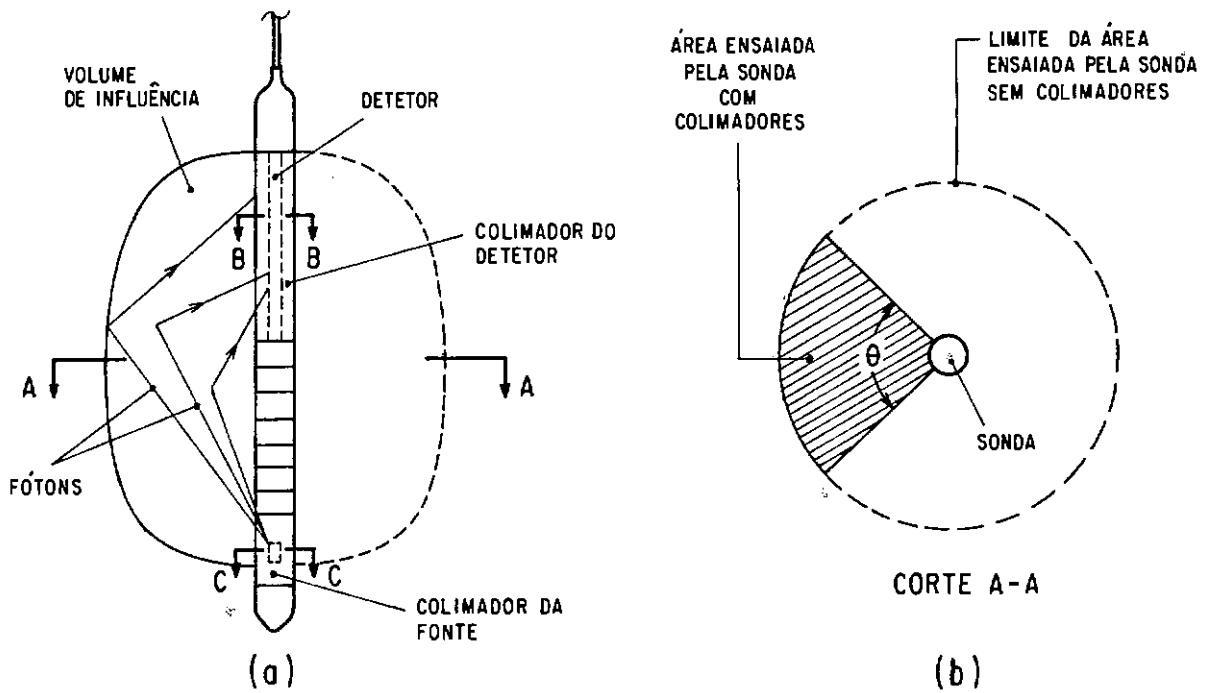


Fig. II.24 - O volume de influência de uma sonda com colimadores.

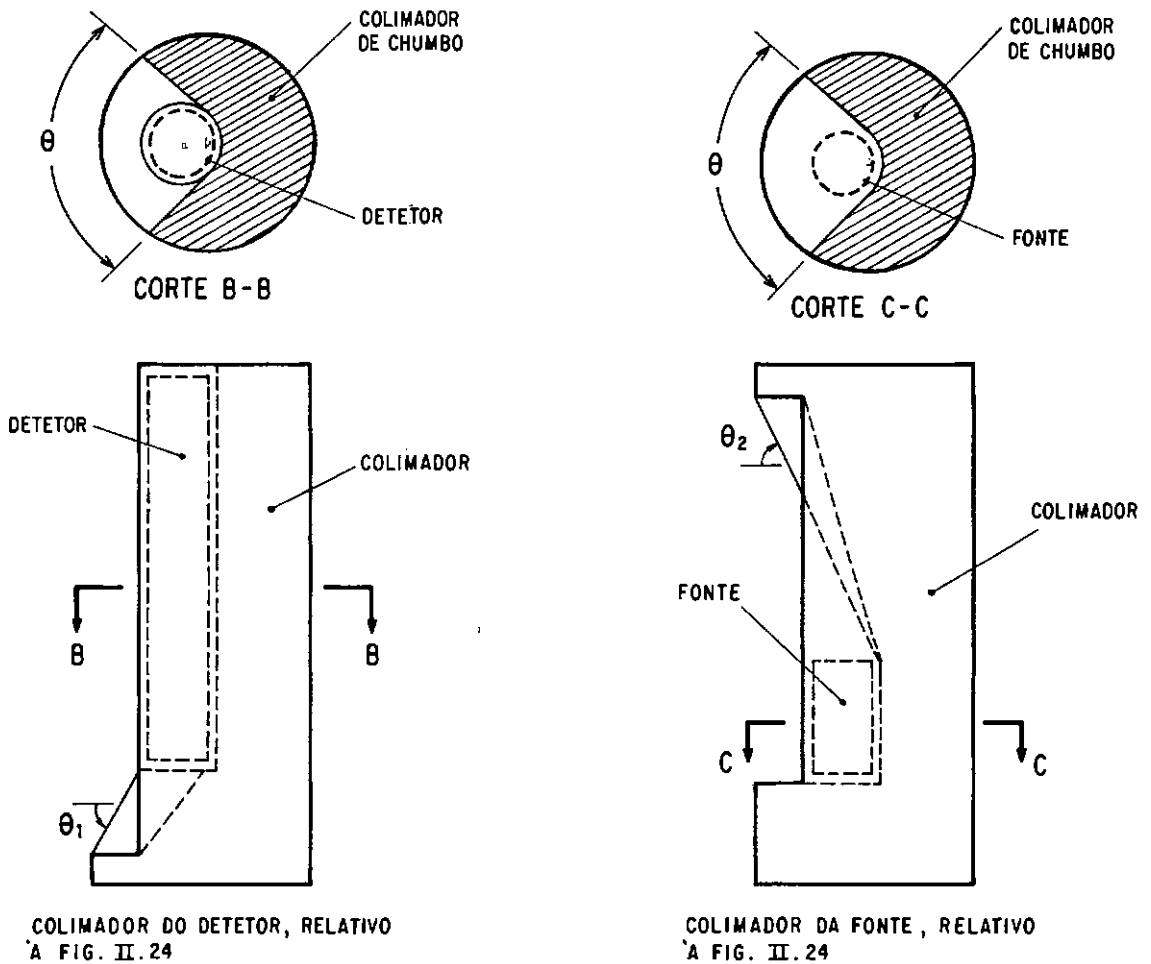


Fig. II.25 - Colimadores para o detetor e a fonte.

gestão de blindagens desse tipo, para a fonte e o detetor, está dada na Fig.II.25. Qualquer blindagem direcional é chamada de colimador e a radiação direcionada é conhecida como radiação colimada. Neste sentido são necessários dois colimadores, um para o detetor e outro para a fonte (Fig.II.25a,b), com as aberturas igualmente direcionadas e coincidentes verticalmente. Os colimadores (Fig.II.25) se constituem em uma blindagem que impede que a radiação da fonte, dispersada (defletida) pelo concreto, chegue ao detetor por todos os lados. A radiação detetada será então, na sua maior parte, proveniente da porção de concreto para qual as aberturas ou janelas estiverem orientadas. Nas Fig's.II.24 e II.25 as aberturas estão orientadas para a esquerda.

Nota-se na Fig.II.25 que, além do ângulo de abertura horizontal Θ dos colimadores, iguais para ambos, há o ângulo vertical de abertura da janela, respectivamente Θ_1 e Θ_2 para o detetor e a fonte. Estes ângulos permitem que um maior número de fótons chegue ao detetor na unidade de tempo através do material ensaiado, podendo-se com isso diminuir o tempo de ensaio em cada profundidade. Pelo mesmo motivo, quando a sonda não é munida de colimadores costuma-se fazer as extremidades da blindagem com a forma cônica (Fig.II.17), em vez de extremidades planas (Fig.II.16).

2.3.4.3d- A Fonte Radioativa

Na tabela II.1 estão os materiais radioativos mais comumente empregados nas fontes de radiação gama das sondas do tipo em questão. Essas fontes são constituídas de um isótopo radioativo, o radioisótopo ou radionuclídeo, contido em uma cápsula selada com dimensões da ordem de um ou dois centímetros.

Embora a meia-vida ($T_{1/2}$) e a energia inicial dos fótons (E_0) sejam características de cada radionuclídeo (ver item 3.1.1), a atividade da fonte vai depender da quantidade ou concentração de material radioativo que encerra. Portanto uma fonte radiotiva está definida não só pelo radionuclídeo de que é feita mas também pela quantidade do mesmo que comporta, que é o que define a sua atividade. Assim a tabela II.1 apresenta radionuclídeos e não fontes, as quais podem ser feitas com praticamente qualquer atividade que se queira, dentro de limites práticos.

Nesta pesquisa empregou-se uma fonte de Co^{60} (item 5.4.4). Este radionuclídeo possui as características da tabela II.1 e Fig.II.23.

Fonte: IAEA(1971) ²⁰				DECAIMENTO DA ATIVIDADE(%)	
ISÓTOPO	MEIA-VIDA (anos)	E ₀ (MeV)	DOSE (miliroentgen/hora, a 1m para 1 milicurie)	1 mes	6 meses
Co^{60}	5,26	1,17 e 1,33	1,30	1,09	6,38
Cs^{137}	30	0,66	0,33	0,192	1,15
Ra^{226}	1620	0,19 e 2,43	8,25	0,00356	0,0214

Tab.II.1 - Radionuclídeos normalmente utilizados para fontes de raios gama nas sondas radioativas.

É um emissor de radiação β e, como consequência, de raios gama, nas energias e proporções indicadas na Fig.II.23.As setas para a direita representam as emissões beta, com as quais o núcleo atinge os níveis de energia indicados. Estes, por sua vez, acabam por ser anulados através das emissões gama - as setas verticais.

Considerando-se que a constante de decaí

mento λ (item 3.1.3) pode ser calculada a partir da equação (OLDENBERG e RASMUSSEN, 1966) ³¹:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{\frac{1}{2}}} \quad , \text{ onde } T_{\frac{1}{2}} = \text{meia-vida}, \quad (\text{II.4})$$

e levando-se em conta os valores da meia-vida dos isótopos dados na Tab.II.1, as duas últimas colunas desta, sobre o decaimento de cada radioisótopo, foram calculados segundo a eq.III.5. Toma-se então consciência de que o decaimento radioativo altera, de modo contínuo no tempo, a curva de calibração das sondas nucleares de densidade. O problema, no entanto, pode ser contornado com o procedimento indicado no item 3.3.

Consta da Tab.II.1 uma coluna que fornece a dose a que se está sujeito a 1 m de distância de uma fonte de 1 mCi de cada radioisótopo. Quanto maior a energia inicial E_0 dos fótons maior a dose. A dose máxima permissível para se receber por hora, 8 horas por dia, 5 dias por semana durante o ano é de $\sim 2,5$ mrem/h (miliroentgen/hora) para os raios gama. Como geralmente se emprega nas sondas fontes com mais de 1 mCi deve-se tomar os devidos cuidados para proteção do pesquisador ou operador desses aparelhos, conforme o apêndice 1, sobre radioproteção.

Maiores detalhes sobre a fonte empregada nos ensaios constam do item 5.4.4.

2.3.4.4 - Tubos de Acesso

Podem ser usados na sondagem gama tubos dos mais diversos materiais (aço, PVC, etc), sendo mais adequados aqueles de material menos denso, por serem mais permeáveis à radiação.

O acesso da sonda ao interior da fundação poderia ser conseguido através de furos ao longo do fuste, feitos por sondagem rotativa ou à percussão. Porém ter-se-ia de esperar até que o concreto estivesse suficientemente sólido para iniciar as perfurações, processo que, quando comparado à utilização de tubos de acesso revela-se bastante caro. Nas perfurações há ainda problemas em se manter a verticalidade dos furos à medida que a profundidade da sondagem aumenta, correndo-se o risco de cortar a armação. Todos esses senões acabaram por levar à adoção dos tubos de acesso na sondagem gama.

Dadas as características do método a fração da área da seção transversal que é efetivamente ensaiada depende, evidentemente, da quantidade de tubos na estaca, cujo número não pode ser elevado a ponto dos custos serem proibitivos. O sistema Testcrete de sondagem gama (PREISS e CAISERMAN, 1975)⁴² normalmente utiliza 2 tubos para estacas com diâmetro de até 60 cm, 3 tubos para diâmetros até 100 cm e, para estacas maiores, 4 tubos, todos sempre fixados internamente à armação e a distâncias iguais entre si. Sem maiores detalhes concluem os autores acima que com esse critério cerca de 25% do concreto da periferia das estacas pode ser ensaiado, afirmação esta algo vaga e que pode ser questionada.

A avaliação de um defeito encontrado pode ser feita através de 3 fatores:

- 1- O número de tubos de acesso nos quais se encontrou defeito (aumento relevante da taxa de contagem) à mesma profundidade ou em profundidades próximas. Quanto maior o número de tubos afetados mais grave o defeito.
- 2- A magnitude do aumento da taxa de contagem e, conseqüentemente, da

diminuição da densidade, que deve então ser estimada.

3- A extensão dos defeitos ao longo dos tubos.

Uma avaliação dos defeitos nessas bases é, portanto, mais de cunho qualitativo, devendo-se pesar os fatores acima presentes no perfil obtido para tirar conclusões sobre a gravidade e extensão das anomalias e as providências cabíveis em cada caso.

2.3.4.5 - Utilização da Sonda

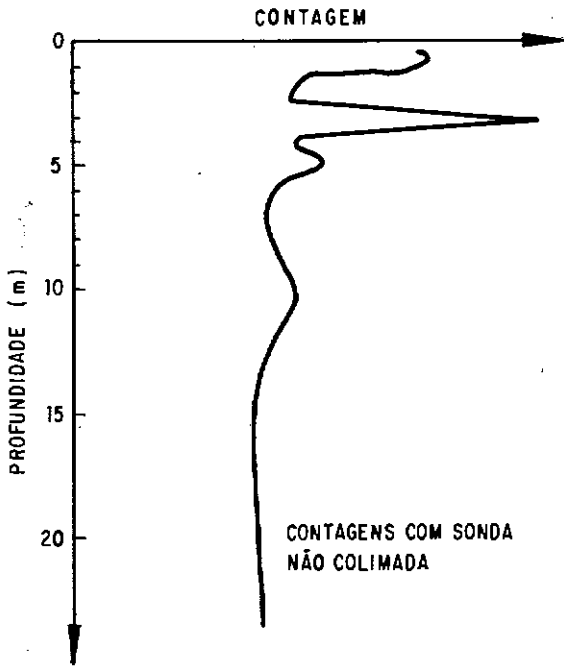
A metodologia do ensaio consiste em primeiramente se obter o perfil radiométrico (curva taxa de contagem versus profundidade, Fig.II.20) de cada tubo percorrendo-o com uma sonda sem colimador. Em seguida, nas profundidades em que forem constatadas falhas no concreto, usa-se a sonda colimada (com colimadores) para se ter idéia da extensão dos defeitos em volta do tubo. Como são instalados no mínimo dois tubos de acesso por estaca, na análise dos resultados deve-se ainda comparar os perfis radiométricos de cada tubo para se avaliar a extensão dos defeitos na seção transversal. Por exemplo, se em uma estaca com três tubos de acesso forem constatadas falhas em todos eles, a uma mesma profundidade ou em profundidades próximas, é provável que seja o mesmo defeito a estender-se por quase toda a seção. Neste caso o problema pode ser bastante grave. Já se as falhas aparecem à mesma profundidade em dois tubos apenas o defeito provavelmente é menos abrangente e menos grave. Quando constatado em um só tubo o defeito pode ser até mesmo desprezível, no que se refere a um bom desempenho da estaca.

Para que seja coberto convenientemente todo o comprimento da estaca PREISS, WEBER e CAISERMAN (1978)⁴³

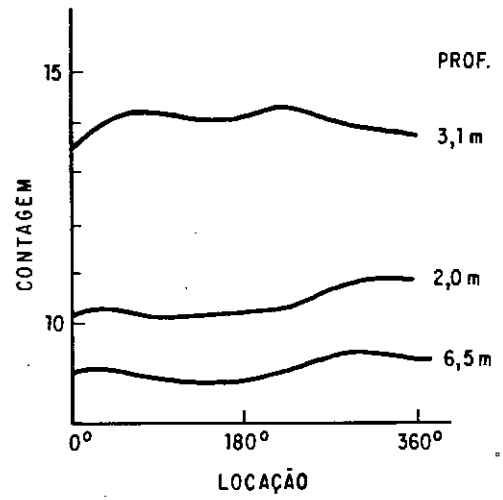
sugerem tomadas de taxa de contagem a cada 10 cm de profundidade nos tubos de acesso, o que praticamente não dá margem a interpe-lações duvidosas entre duas medidas quaisquer.

Na Fig.II.20 ve-se que o resultado da utilização de uma sonda não colimada em cada tubo de acesso da estaca é posto na forma de um perfil radiométrico (curva taxa de contagem versus profundidade) o qual, através da curva de calibração (Fig.II.19), pode ser transformado no perfil de densi-dades do concreto ensaiado (peso específico versus profundidade). Como as tomadas de taxa de contagem são feitas baixando-se a son-da no tubo de acesso pode-se localizar a que profundidade está o defeito, isto é, torna-se possível avaliar a extensão da falha ao longo do tubo percorrido (Fig.II.20). Conforme se sabe várias ocorrências podem configurar um defeito: a intrusão no concreto do fuste de lama bentonítica, de solo, a presença de vazios, etc. Tanto os vazios como porções de lama bentonítica ou mesmo de so-lo possuem densidade bem abaixo daquela do concreto, o que acar-reta um incremento da taxa de contagem, como mostrado na Fig.II.20.

Para as sondas colimadas os resultados são postos conforme as Fig's II.26b e II.27b, podendo-se avaliar agora a extensão da falha em torno do tubo de acesso (PREISS et alii, 1978) ⁴³. Para tanto, escolhido um referencial fixo sobre a circunferência do tubo (Fig.II.27c), são feitas as leituras rodando-se a sonda sobre si mesma de modo a cobrir os 360° possí-veis. No caso da Fig.II.26 uma falha detetada na profundidade de 3,1 m é vista estender-se ao redor de todo o tubo (Fig.II.26b). Em outro exemplo dos mesmos autores, Fig.II.27, é dado um perfil radiométrico (sonda não colimada) e uma leitura azimutal (angu-lar) feita com sonda colimada em uma falha detetada na profundida

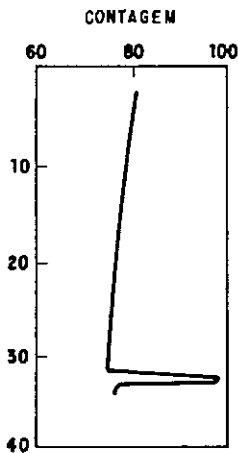


(a) - Perfil radiométrico.

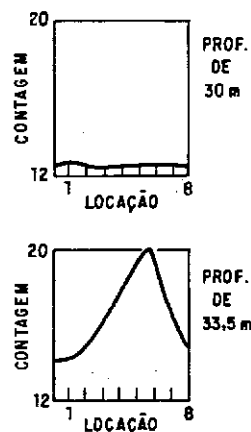


(b) - Contagens com sonda colimada para o perfil da fig. 26a.

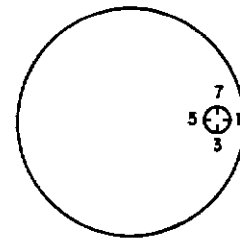
Fig. II.26 - Resultados de sondagem gama em uma estaca, praticada em tubo de acesso.



(a) - Contagens com sonda não colimada.



(b) - Contagens com sonda colimada para a perfil da fig. 27a.



(c) - Locação azimutal das contagens (b).

Fig. II.27 - Resultados de sondagem gama em estaca, praticada em perfuração rotativa.

(Fonte das fig.'s II. 26 e II.27 : PREISS et alii, 1978) ⁴³

de de 33,5m (Fig.II.27b). Pode-se ver que o defeito se estende a penas parcialmente em torno do tubo.

Portanto, com uma sonda não colimada e outra colimada, encontrado um defeito o passo seguinte é avaliá-lo em extensão tanto na vertical, através do perfil radiométrico, como na horizontal, por meio das leituras azimutais e do número de tubos com defeitos à mesma profundidade.

Uma sonda radioativa típica, que compõe o sistema Testcrete de verificação da integridade de estacas escavadas e paredes moldadas no solo, foi apresentada por PREISS e CAISERMAN (1975)⁴². O esquema básico do aparelho é o já apresentado na Fig. II.16. A sonda possui diâmetro externo de 48 mm e 600 mm de comprimento estando ligada por um cabo de 30 m a um sistema de contagem dos fótons detetados, na superfície do terreno (Fig.II.16). Este cabo serve tanto para levar energia ao detector e transmitir à superfície os impulsos elétricos que configuram os fótons detetados como para sustentar a própria sonda, ao ser baixada e içada no tubo de acesso. Reportam os mesmos autores que em Israel, de maio de 1972 a dezembro de 1974, já haviam sido ensaiadas pelo sistema Testcrete cerca de 1024 estacas escavadas, tendo o método se firmado como um ensaio padrão de verificação da integridade.

PREISS e CAISERMAN (1975)⁴² avaliaram o volume de influência da sonda utilizada como tendo aproximadamente 25 cm de altura e penetrando 10 cm no concreto ao redor do tubo de acesso. Incluindo-se os 5 cm de diâmetro do tubo (PREISS et alii, 1978)⁴³ a área ensaiada possui portanto um diâmetro de cerca de 25 cm, com 490 cm², e está localizada justamente na periferia da estaca, onde a probabilidade de ocorrência dos defeitos é maior.

O sistema Testcrete se utiliza de tubos de acesso de aço, os quais, segundo PREISS et alii (1978)⁴³, poderiam ter sua resistência considerada no cálculo da estaca, o que no entanto não foi apontado como já tendo ocorrido.

Mesmo no concreto íntegro, ao se empregar a sonda observa-se uma certa dispersão nos valores da taxa de contagem, devida tanto à falta de homogeneidade inerente ao próprio concreto quanto à flutuação estatística da radioatividade (item 3.1.3). No entanto, esclarecem PREISS e CAISERMAN (1975)⁴² que o incremento da taxa de contagem devido a um defeito excede em muito aquele constatado na dispersão normalmente observada em concreto íntegro. Sem maiores comentários PREISS et alii (1978)⁴³ observam que a sonda, embora não possa detetar fendas ou descontinuidades pouco espessas no concreto, é um tanto sensível a variações relativamente pequenas na densidade do concreto do volume de influência como um todo.

2.3.4.6 - Causas de Erro no Método

2.3.4.6a- Introdução

As causas relevantes de erro na sondagem gama por retrodispersão são as que se seguem:

- 1- Mudança das características do tubo de acesso.
- 2- Variação das características elétricas do sistema de contagem.
- 3- Falta de uniformidade na densidade do meio. Efeito da armação da estaca e do solo que circundam o fuste.
- 4- Decaimento da fonte radioativa.
- 5- Flutuação estatística da taxa de contagem.
- 6- Variação da composição química do meio. Embora muitos autores

a relevem, quando as condições estão presentes esta pode ser a causa principal de erros, tanto por causá-los significativos como por ser mais difícil evitá-la. Mereceu portanto no item 2.3.4.6f considerações algo minuciosas.

Para se avaliar e desenvolver devidamente um método de verificação da integridade de estacas escavadas é necessário ter conhecimento das possíveis causas de erro, para que os aparelhos envolvidos possam ser escolhidos e projetados de forma a minimizá-las, com o que se concorre para viabilizar e, mais do que isso, otimizar o método. Daí a importância dos itens seguintes, dado que esta pesquisa configura o início do projeto e desenvolvimento de uma sonda nuclear para a sondagem gama de estacas, com os resultados dos primeiros ensaios de avaliação do método:

2.3.4.6b- Mudança das Características do Tubo de Acesso

Na construção da curva de calibração são empregados vários corpos de prova cilíndricos, de diferentes materiais e densidades correspondentes, nos quais o tubo de acesso centrado permite a introdução da sonda e as respectivas tomadas de taxa de contagem. Os tubos de acesso instalados nas estacas da obra devem ter as mesmas características daqueles usados nos corpos de prova. Ou seja, devem ser do mesmo material e possuir as mesmas características geométricas: diâmetro interno e espessura de parede. Desse modo pode-se garantir que o tubo de acesso não irá influenciar na relação taxa de contagem r x densidade ρ , isto é, serão mantidas as mesmas condições de calibração no laboratório e no campo.

Tubos de material mais denso ou de paredes mais espessas do que na calibração acarretariam maior absorção da radiação que penetra o material ensaiado, diminuindo assim a taxa de contagem obtida para a densidade correspondente. Para o concreto, invariavelmente no ramo descendente das curvas de calibração, onde $dr/d\rho < 0$, ocorreria então uma superestimativa da densidade. Já com tubos de material menos denso ou paredes mais finas aconteceria justamente o contrário, sendo a densidade do concreto subestimada.

Uma emenda entre segmentos do tubo de acesso, quando feita por exemplo com uma luva, como que aumenta a espessura da parede do tubo, com os efeitos correspondentes já acima mencionados. As emendas de segmentos do tubo tornam-se inevitáveis à medida que o comprimento das estacas aumenta. O que se deve fazer é anotar a profundidade das mesmas para que as taxas de contagem aí obtidas possam ser devidamente interpretadas.

Deve-se evitar o uso de tubos de má qualidade, que possuam variações expressivas da espessura das paredes, o que afeta a determinação da densidade. DNO e MACHIDA(1965)³² se referem a esse fato.

Por outro lado, na verificação da integridade de estacas escavadas por sondas radioativas muitas vezes não se está interessado em medir propriamente a densidade do concreto, mas em avaliar a sua integridade apenas pela observação da variação significativa ou não da taxa de contagem. Desse modo, a troca do tubo da calibração por outro de características diferentes não invalida o método, embora o prejudique impedindo a determinação da densidade do material do fuste.

É claro que os efeitos indesejáveis sobre

a taxa de contagem acima comentados serão tão mais acentuados quanto mais as características dos tubos da obra se afastarem daquelas dos tubos da calibração. Por exemplo, ao se usar na obra tubos de aço, quando na calibração foram empregados outros de PVC, os erros são grandes. Seriam menores se a diferença de densidade dos materiais não fosse tão acentuada.

Um outro fator que afeta bastante os resultados obtidos com a sonda radioativa é uma folga excessiva entre o diâmetro interno do tubo de acesso e o diâmetro externo da sonda (Fig.II.28). Explica PLATA (1972)³⁷ que se o espaço entre a sonda e a parede do tubo é grande há um aumento significativo da taxa de contagem devido a uma elevada quantidade de fótons que chegam ao detetor da maneira indicada na Fig.II.28. O mesmo autor afirma ainda que a folga deve ser de no mínimo 4 ou 5 mm para que esta parcela dos fótons não seja relevante. Já ONO e MACHIDA (1965)³² estabelecem 3 mm como limite superior aceitável para a folga. Portanto uma folga excessiva do tubo de acesso pode invalidar totalmente a determinação da densidade, por provocar um aumento na taxa de contagem através de uma quantidade de fótons que justamente não depende da densidade do material ensaiado. Esse aumento, portanto, corresponde a um acréscimo apenas do "background" da sonda, o qual, segundo ensaios de ONO e MACHIDA (1965)³², cresce linearmente com a folga no tubo. De qualquer modo não há maiores dificuldades em evitar tais problemas, bastando se adotar nas estações os mesmos tubos utilizados na calibração.

2.3.4.6c- Variação das Características Elétricas do Circuito de Contagem

Para a contagem dos fótons defletidos

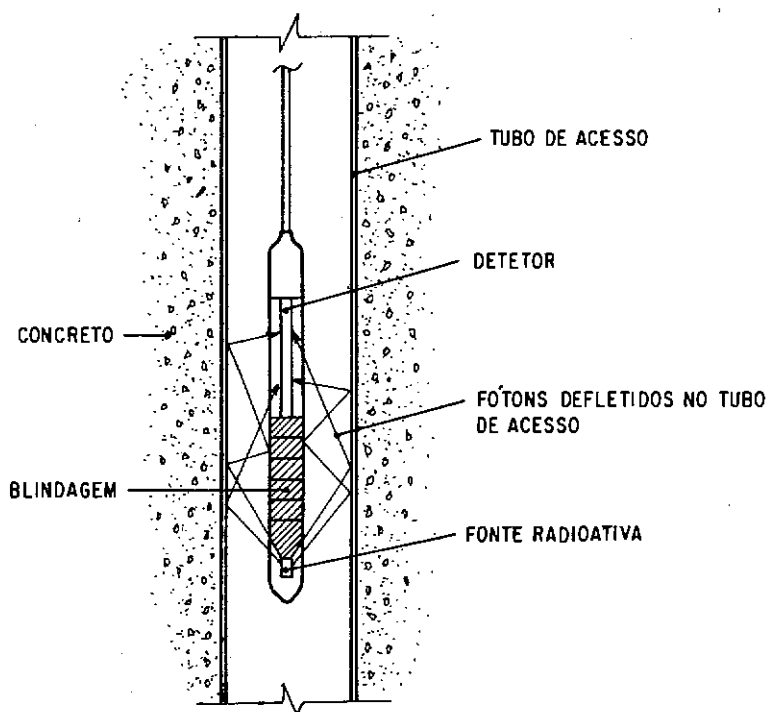


Fig. II.28 - Efeito de uma folga excessiva no tubo de acesso: Aumento da taxa de contagem obtida de uma quantidade de fótons que é insensível à densidade do material ensaiado. (PLATA, 1972)³⁷

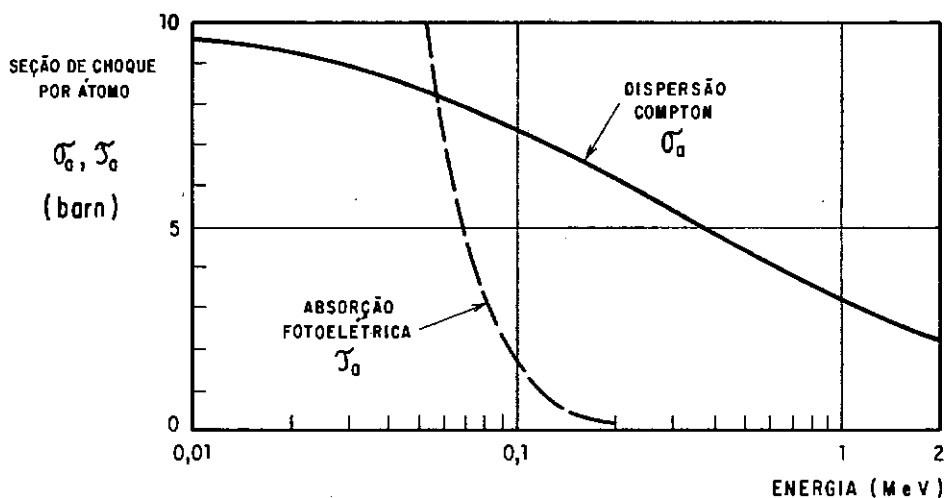


Fig. II.29 - Seção de choque Compton e fotoelétrica por átomo médio de um solo ou concreto ($Z=15$, $A=31$), em função da energia do fóton incidente. Segundo Grodstein, 1957. Fonte: PREISS (1966)³⁹

pelo concreto o método utiliza circuitos e aparelhos eletrônicos que, se sofrerem alguma mudança em suas características elétricas, podem acarretar variações indesejáveis da contagem obtida. De acordo com ONO e MACHIDA (1965) ³² as causas de uma variação das propriedades elétricas do circuito de contagem podem ser vários. A eficiência de detetores Geiger-Müller é diminuída quando ocorrem aumentos significativos de temperatura, o que também influencia o nível de discriminação de circuitos transistorizados. A perda de isolamento do circuito do pré-amplificador devido à condensação de umidade pode causar dificuldades, como também uma falta de estabilidade na tensão de alimentação do detetor. Como ocorreu no início dos ensaios desta pesquisa, um mau isolamento de uma das conexões do cabo de alimentação da sonda pode ser vencido pela alta tensão fornecida ao detetor, o que provoca descargas sucessivas entre elementos condutores do cabo e introduz por isso pulsos espúrios na taxa de contagem, que pode ser bastante alterada. Essas descargas podem produzir pequenos estalidos, facilitando a localização do defeito.

Como observam os mesmos autores essas causas de erro podem ser evitadas tomando-se os devidos cuidados, tais como a verificação do funcionamento dos aparelhos antes e após as operações de campo. Esse procedimento visa verificar se a sonda iniciou e findou os trabalhos em boas condições de utilização. Medidas nesse sentido, porém muito mais rigorosas, foram tomadas neste trabalho (item 5.9).

2.3.4.6d- Falta de Uniformidade na Densidade do Meio

Esclarece PLATA (1972) ³⁷ que o fluxo de fotóons que alcança o detetor diminui à medida que nos afastamos

do tubo de acesso. Assim, a contribuição relativa na taxa de contagem dos fótons que se deslocam pelas regiões mais afastadas do volume de influência é inferior à contribuição correspondente às regiões mais próximas. Portanto, conclui o autor, se em um meio a densidade não é constante dentro do volume de influência, a taxa de contagem difere da que se obteria com uma densidade uniforme, igual à densidade média deste volume (Fig.II.30). Se, por exemplo, as regiões do volume de influência mais próximas da sonda possuem um maior peso específico a taxa de contagem será errônea para menos (Fig.'s II.30a e b), do contrário será errônea para mais (Fig.'s II.30b e c). Vê-se então que a magnitude do erro é função do gradiente de densidade dentro do volume de influência, crescendo com o mesmo.

A experiência de ONO e MACHIDA (1965)³², relatada no item 3.2, sobre o raio de influência da sonda, se presta a um outro tipo de interpretação, com conclusões que comprovam as afirmações de PLATA (1972)³⁷. Os gráficos da Fig.III.8, taxa de contagem para água versus raio do recipiente, são o resultado dessa experiência, que serviu para determinar o raio de influência da sonda dos autores num meio constituído de água. Escolhendo uma curva pode-se calcular aproximadamente, para cada 5 cm do raio do recipiente, a porcentagem do total de fótons detetados que se utiliza de cada trecho desses para chegar ao detetor. Tais resultados, para $l_s = 6$ cm, estão na tabela II.2.

Vê-se então que, para cada trecho do raio de influência, a contribuição relativa na taxa de contagem dos fótons que por aí passam é diferente, diminuindo à medida que o trecho se afasta da sonda. Estas conclusões, portanto, concordam com o que acima reportamos, segundo PLATA (1972)³⁷.

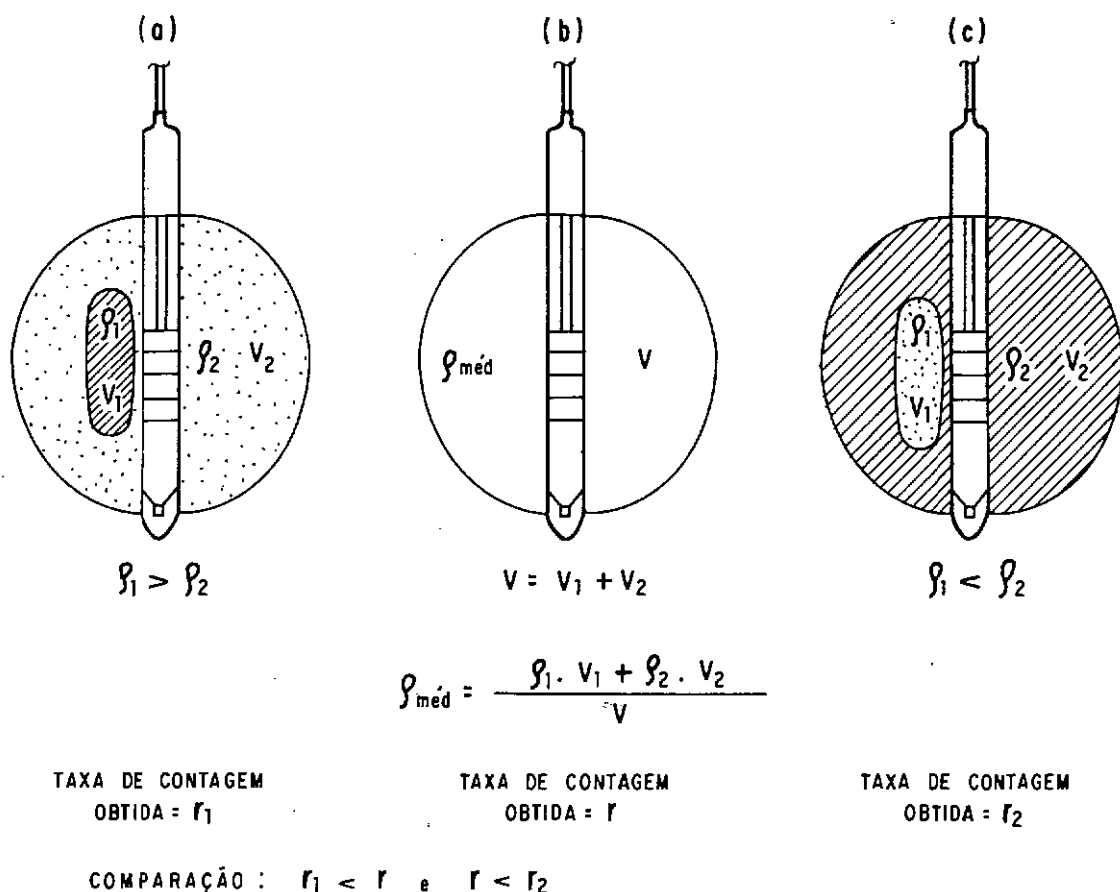


Fig. II.30 - Efeito na taxa de contagem da falta de uniformidade na densidade do meio contido no volume de influência.

Sonda de ONO e MACHIDA (1965) - Meio: ÁGUA			
PORÇÃO DO RAIOS DO RECIPIENTE (cm)	FRAÇÃO DA TAXA DE CONTAGEM (%)	PORÇÃO ACUMULADA DO RAIOS DO RECIPIENTE (cm)	FRAÇÃO ACUMULADA DA TAXA DE CONTAGEM (%)
0 - 5	45	0 - 5	45
5 - 10	30	0 - 10	75
10 - 15	14	0 - 15	89
15 - 20	6	0 - 20	95
20 - 25	5	0 - 25	100

Tab. II.2 - Contribuição relativo na taxa de contagem dos fótons que viajam por cada trecho de 5cm do raio de influência na água, este de 20cm.
Sonda de ONO e MACHIDA (1965)³²

Portanto, quando há falta de uniformidade na densidade do meio dentro do volume de influência, ocorre um erro na taxa de contagem em relação à que seria obtida para a densidade média do volume ensaiado. É impossível evitar esse erro nos ensaios de campo, quando as condições para que ocorra estão presentes. Ele pode ser significativo nas sondas usadas para medida de densidade, por exemplo, de solos, já que um erro na taxa de contagem acarreta outro correspondente na densidade que se deseja medir, cujo valor será dependente da inclinação da curva de calibração. Porém para a verificação da integridade de estacas escavadas esse erro na taxa de contagem não é tão prejudicial, podendo, pelo contrário, ser até benéfico. O fato é que a integridade do concreto pode ser avaliada apenas pela observação da taxa de contagem, e o fenômeno acima descrito, então, apenas exacerba em certa medida o aumento da taxa advindo de um defeito mais próximo ao tubo de acesso, o que pode causar algum exagero da sua importância. No entanto, quando há suspeita de que isto esteja ocorrendo, a gravidade do defeito pode ser avaliada observando-se a sua extensão no perfil radiométrico, o número de tubos acusando defeito a profundidades próximas e, ainda, quando se julgar necessário, tomando-se medidas adicionais com uma sonda colimada.

Há autores, como ONO e MACHIDA (1965)³², que consideram tanto as diferenças na composição química entre os materiais da calibração e os do campo, bem como a falta de uniformidade dos materiais da calibração, como sendo as causas de incertezas das taxas de contagem das curvas de calibração e, portanto, de erros na determinação da densidade. O que, de fato, é verdade. No entanto, nesta pesquisa, ao invés de reunir tais causas em um enfoque único, como fizeram os autores mencionados, resolveu -

se analisá-las em separado, para uma melhor compreensão das mesmas.

Quanto às diferenças de composição química elas têm seus efeitos devidamente considerados no item 2.3.4. 6g. Em relação à falta de uniformidade na densidade dos materiais da calibração, deve-se cuidar para que os corpos de prova sejam homogêneos. À semelhança de raciocínios feitos acima, esses erros são bem mais importantes nas sondas de densidade do que naquelas para verificação da integridade, uma vez que nestas interessa mais uma comparação relativa das taxas de contagem obtidas enquanto que nas primeiras o objetivo é o conhecimento da própria densidade.

Há, ainda, o efeito da armação da estaca na taxa de contagem, que é o de diminuí-la, desde que o aço possui densidade mais elevada que o concreto (~ 7,8 contra 2,4). Esse efeito, para uma melhor compreensão, pode ser visto como a soma de dois outros: o da armação longitudinal e o da armação transversal ou estribos.

No caso da armação longitudinal essa diminuição, pelas mesmas razões já apontadas acima, é também um pouco exacerbada, sendo de qualquer maneira constante em média em um mesmo tubo, portanto não atrapalhando na verificação da integridade pela comparação relativa das taxas de contagem. No entanto, a influência da armação longitudinal nas taxas pode variar na mesma estaca de um para outro tubo de acesso, conforme ele esteja mais ou menos afastado de uma das barras longitudinais. A providência que pode uniformizar essa influência em todos os tubos é fixar cada um deles junto a uma dessas barras.

Quanto à armação transversal seu efeito

na taxa de contagem não pode ser uniformizado, o que também não chega a prejudicar o ensaio de integridade. Tal efeito será máximo, isto é, a taxa de contagem será mínima, quando uma das barras transversais, em uma posição de medida qualquer da sonda, estiver na altura ou pouco acima da fonte radioativa. A barra absorverá parte da radiação logo que esta saia do tubo de acesso, impedindo-a de chegar ao concreto. No entanto essa influência, como se pode perceber, é praticamente pontual, ocorrendo apenas quando coincide em uma medida da barra estar na posição mencionada. Ainda assim a diminuição na taxa de contagem deve ser relativamente sem importância, dado que o diâmetro das barras transversais não é grande. Posto isto, não é difícil se deduzir que o efeito de uma dessas barras quando diante do detetor da sonda é ainda menor, sendo, portanto, desprezível. Nessa posição a barra cobriria apenas um pequeno segmento do comprimento total do detetor, logo absorvendo muito pouca radiação.

Devido à posição dos tubos de acesso, próximos à periferia da estaca, um certa porção de solo é abrangida pelo volume de influência, o que eleva a taxa de contagem em relação à do concreto íntegro. No entanto, adotadas providências para se garantir um cobrimento uniforme da armação, essa influência na taxa de contagem se torna constante em média. O que não prejudica portanto a verificação da integridade pela comparação das taxas entre si.

2.3.4.6e- Decaimento da Fonte Radioativa

A eq.III.5 mostra que a atividade de uma fonte radioativa decresce continuamente no tempo, isto é, diz-se que a sua atividade decai. Para uma sonda nuclear a consequência

direta desse fato é que, na verdade, a sua curva de calibração também se altera ao longo do tempo, com as suas taxas de contagem diminuindo e causando assim uma sobrestimativa na densidade (no caso de curvas de calibração com inclinação negativa).

Cálculos que permitissem uma avaliação do decaimento da atividade para os radioisótopos mais empregados em sondas foram realizados no item 2.3.4.3d, na parte sobre a fonte radioativa, estando os resultados na tab.II.1. Vê-se que o decaimento se torna maior do que 1% para o Co^{60} em 1 mês e, em 6 meses, o mesmo também ocorre para o Cs^{137} , sendo o decaimento ainda desprezível para o Ra^{226} , só ultrapassando 1% quando decorridos 23,5 anos. Portanto para o rádio esse problema não existe na prática, o que já é não verdade para o césio e, muito menos, para o cobalto. Para contornar essa dificuldade com estes dois últimos radioisótopos BALLARD e GARDNER (1965)³ sugerem que a resposta dos aparelhos que os utilizam seja tomada sempre como a razão entre a taxa de contagem do ensaio, r , e a taxa r_0 obtida em um corpo de prova padrão na mesma ocasião. É o chamado método da razão das taxas. Como, para um mesmo padrão, as diversas razões r/r_0 são constantes, apontam os mesmos autores que esse método compensa automaticamente as variações da taxa da contagem devidas ao decaimento radioativo, compensando também variações da taxa provenientes de instabilidade do sistema de medição. O método, portanto, é de enorme utilidade, sendo atualmente recomendado por fabricantes de aparelhos nucleares para medida da densidade de solo (por exemplo, TROXLER LABORATORIES, 1974 e 1977)^{56/57}. Consiste em se trabalhar com uma curva de calibração do tipo " $(r/r_0) \times \rho$ ", em vez da curva tradicional " $r \times \rho$ ", já que a razão r/r_0 é essencialmente

constante uma vez mantido o corpo de prova padrão onde se toma r_0 .

Também aqui deve-se notar que o decaimento das taxas de contagem é importante na medida em que acarreta um erro na densidade, que se torna cada vez mais significativo com o tempo. Já no caso da verificação da integridade o decaimento não se apresenta com a mesma importância, desde que a integridade pode ser avaliada pela comparação das taxas de contagem entre si, com a constância aproximada das mesmas atestando o bom estado do concreto.

2.3.4.6f- Flutuação Estatística da Taxa de Contagem

É analisado no item 3.1.3 o caráter intrinsecamente aleatório da radioatividade, a partir do que se pode compreender o fato de que também uma taxa de contagem qualquer possui a sua flutuação estatística inerente. Desse modo uma taxa de contagem r possui um valor médio \bar{r} , em torno do qual ocorrem os demais valores com um desvio padrão teórico chamado de σ_r (item 3.5.2). Portanto, esse erro padrão σ_r , juntamente com a inclinação $dr/d\rho$ da curva de calibração, acarreta um erro padrão na determinação da densidade, que é dado por:

$$\sigma_\rho = \frac{\sigma_r}{|dr/d\rho|} \quad (\text{II.5})$$

Assim sendo, para se ter erros na densidade satisfatoriamente pequenos, deve-se escolher dentre as curvas de resposta da sonda aquela mais adequada e que passa a ser a sua curva de calibração (item 6.5.1). Sempre é possível, dessa maneira, se chegar a pequenos erros na densidade.

No caso da verificação da integridade de

estacas escavadas a flutuação estatística da taxa de contagem, por ser pequena (item 6.7.2), não chega a prejudicar uma avaliação do estado do concreto, o que é feito através da observação da regularidade do próprio perfil radiométrico obtido, sem a real necessidade de se obter o perfil de densidades, o que, no entanto, pode ser feito se desejado.

2.3.4.6g- Variação da Composição Química do Meio

Ainda que a densidade de um determinado meio permaneça constante, se houver uma mudança na sua composição química ocorrerá uma correspondente variação da taxa de contagem nele obtida, o que acarreta um erro na determinação da sua densidade. A compreensão dessa variação na taxa de contagem, bem como a sua quantificação, exige o entendimento dos conceitos que se seguem.

Para as energias dos fótons gama emitidos pelo cézio 137(0,66 Mev) e, principalmente, pelo cobalto 60(1,17 e 1,33 Mev) interessam unicamente os efeitos Compton e fotoelétrico (item 3.1.2). Na verdade suas probabilidades de ocorrência determinam a resposta da sonda, constituída apenas de fótons dispersados por interação Compton mas não absorvidos fotoelétricamente. Essas probabilidades são afetadas em certo grau pela composição química, o que se analisa agora.

Define-se em Física Nuclear a probabilidade de ocorrência do efeito Compton por elétron. É um parâmetro chamado também de seção de choque Compton por elétron (explicações muito boas do que é a seção de choque microscópica da interação de uma radiação com um material, e de como se pode medi-la, podem ser encontradas em RESNICK e HALLIDAY, 1977, e IPR, 1968)^{47/21}. A seção de choque Compton por elétron, σ_e , depende apenas da energia do

fóton incidente (BALLARD e GARDNER, 1965) ³ . Como toda seção de choque, possui a dimensão de uma área, sendo dada geralmente em barns por elétron ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Pode ser interpretada como a área efetiva que uma partícula (no caso, um elétron) oferece como alvo para uma radiação (no caso, um fóton gama), não tendo necessariamente relação com a área geométrica frontal da mesma. Se não há probabilidade da radiação interagir com a partícula, a seção eficaz de choque é nula, apesar de não ser nula a seção geométrica da partícula-alvo.

Para uma substância composta de n elementos químicos, de respectivos números atômicos Z_i e números de massa A_i (\sim a massa atômica do elemento i), presentes nas proporções p_i , a seção de choque Compton por átomo do elemento i , σ_{ai} , é dada então por

$$\sigma_{ai} = \sigma_e \cdot Z_i \text{ (barns/átomo } i) \quad (\text{II.6})$$

Por outro lado tem-se, segundo a lei de Avogrado (PREISS, 1966) ³⁹ , que o número de átomos do elemento i por cm^3 da substância, n_{ai} , vem dado por:

$$n_{ai} = N_A \cdot \frac{p_i \cdot \rho}{A_i} \text{ (átomos } i/\text{cm}^3) \quad (\text{II.7})$$

onde ρ é a massa específica da substância e N_A o número de Avogrado, isto é, o número de átomos contidos em 1 átomo-grama de um elemento. O átomo-grama do elemento i é a massa do mesmo igual à sua massa atômica A_i expressa em gramas.

Portanto, quando um fóton gama incide sobre 1 cm^3 da referida substância, perpendicularmente a uma face unitária desse volume e em um ponto aleatório da mesma, a probabilidade de que haja uma interação Compton com o elemento i , por cm de penetração do fóton, é dada pela área efetiva total ofere-

cida pelo dito elemento por cm^3 , σ_i , que é igual a

$$\sigma_i = \sigma_{a_i} \cdot n_{a_i} \quad (\text{barns/cm}) \quad (\text{II.8})$$

É a chamada seção de choque Compton macroscópica, oferecida pelo elemento i , no caso.

Para a substância formada por n elementos químicos, a seção de choque Compton macroscópica é dada consequentemente por

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{barns/cm}) \quad (\text{II.9})$$

Pelas equações II.6, II.7 e II.8, e reparando que a massa específica μ do material é a sua densidade aparente ρ multiplicada pela massa específica μ_a da água, pode-se reescrever a equação II.9 da forma

$$\sigma = \sigma_e \cdot N_A \cdot \mu_a \cdot \rho \cdot \sum p_i \frac{Z_i}{A_i} \quad (\text{barns/cm}) \quad (\text{II.10})$$

Ou seja, definindo-se a constante $K_1 =$

$$\sigma_e \cdot N_A \cdot \mu_a :$$

$$\sigma = K_1 \cdot \rho \cdot \sum p_i \frac{Z_i}{A_i} \quad (\text{barns/cm}) \quad (\text{II.11})$$

Esta é, portanto, a expressão da seção de choque macroscópica para o efeito Compton, também chamada de coeficiente de absorção linear Compton. Mede a probabilidade de ocorrência desse tipo de interação por centímetro de penetração do fóton no material. Em outras palavras, é a área total efetiva de choque Compton por centímetro de profundidade da substância em questão, quando um fóton gama incide perpendicular e aleatoriamente sobre uma área de 1 cm^2 . Logo, para se obter a seção de choque Compton como um número absoluto, propriamente uma probabilidade de interação Compton por cm de penetração do fóton no material, basta dividir a expressão II.11 por 1 cm^2 :

$$\sigma = K_1 \cdot \rho \cdot \sum p_i \cdot \frac{Z_i}{A_i} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (\text{II.12})$$

Desse modo o caminho livre médio l que um fóton de certa energia percorre no material antes de interagir através do efeito Compton é dado por

$$l = 1/\sigma \quad (\text{cm}) \quad (\text{II.13})$$

Pela equação II.12 ve-se que a seção de choque Compton, além de ser diretamente proporcional à densidade ρ , depende ainda do que PREISS (1965)³⁸ chama de fator de dispersão Compton β_c :

$$\beta_c = \sum p_i \cdot \frac{Z_i}{A_i} = \overline{Z/A} \quad (\text{II.14})$$

que é o que quantifica a influência da composição química na ocorrência do efeito Compton.

Pode-se iniciar uma análise dessa influência com uma observação da Tab.II.3, que mostra os elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre. A variação máxima que ocorre para o fator $\beta_c (= Z/A)$ é de 9,9%, do menor para o maior valor e excetuando-se o hidrogênio, presente quase que somente na água de unidade e cuja influência é analisada adiante. Essa variação em β_c pode ser considerada elevada, conclusão que no entanto não pode ser aplicada na prática, uma vez que os elementos químicos da Tab.II.3 não estão presentes isoladamente nos materiais, mas combinados. Este fato, na realidade, reduz consideravelmente a dispersão do parâmetro β_c , como pode ser visto na Tab.II.4, com uma variação máxima do mesmo igual a 1% para os solos, agregados e cimento considerados. Portanto a variação em β_c é até bem pequena, em se tratando apenas de materiais secos.

Já considerando-se a água em relação aos demais materiais da Tab.II.4 a variação máxima de β_c é de 12,3%

ELEMENTO QUÍMICO	ABUNDÂNCIA %	NÚMERO ATÔMICO Z	MASSA ATÔMICA MÉDIA A	Z/A	Z ⁵ /A
O	46,6	8	16,0	0,500	0,2048×10 ⁴
Si	27,7	14	28,1	0,498	0,1913×10 ⁵
Al	8,1	13	27,0	0,482	0,1377×10 ⁵
Fe	5,0	26	55,8	0,466	0,2130×10 ⁶
Ca	3,6	20	40,1	0,499	0,7984×10 ⁵
Na	2,8	11	23,0	0,478	0,6998×10 ⁴
K	2,6	19	39,1	0,486	0,6333×10 ⁵
Mg	2,1	12	24,3	0,494	0,1025×10 ⁵
Ti	0,5	22	47,9	0,459	0,1075×10 ⁶
H	0,1	1	1	1,000	1,0000
P	0,1	15	31,0	0,484	0,2450×10 ⁵
Mn	0,1	25	54,9	0,455	0,1777×10 ⁶
S	0,05	16	32,1	0,498	0,3264×10 ⁵
C	0,03	6	12,0	0,500	0,6480×10 ³

Tab.II.3 - Elementos mais abundantes na crosta terrestre. Fonte: BALLARD e GARDNER (1965) ³

Fonte : PREISS(1967) ⁴⁰		
Material	$\beta_c = \overline{Z/A}$	$\beta_p = \overline{Z^5/A}$
Argila	0,497	20.000
Marga arenosa	0,498	15.200
Areia	0,499	11.200
Água	0,555	1.820
Granito	0,497	—
Basalto	0,499	
Rocha Calcária 1	0,499	
Rocha Calcária 2	0,494	
Areia do rio Tâmisa	0,499	
Cimento portland comum	0,499	
Fonte: PREISS(1965) ³⁸		

Tab.II.4 - Fatores β_c e β_p para alguns solos, agregados típicos para concreto, cimento e água.

PROPORÇÃO DOS MATERIAIS			TIPO DO AGREGADO	$\beta_c = \overline{Z/A}$
ÁGUA	CIMENTO PORTLAND	AGREGADO		
0,8	1,0	1,5	Granito	0,512
0,3	1,0	9,0		0,500
0,8	1,0	1,5	Basalto	0,513
0,3	1,0	9,0		0,502
0,8	1,0	1,5	Rocha Calcária 1	0,513
0,3	1,0	9,0		0,501
0,8	1,0	1,5	Rocha Calcária 2	0,509
0,3	1,0	9,0		0,497

Tab.II.5 - Fator de dispersão Cpmpton β_c para uma vasta gama de concretos. Fonte: PREISS(1965) ³⁸

para mais, efeito que é devido à presença nesse material do hidrogênio, cujo β_c é o dobro daquele dos demais elementos (Tab. II.3,1 contra $\sim 0,5$). Portanto conclui-se que a presença de água nos solos e demais materiais contribui para elevar em certo grau o fator β (no máximo em $\sim 12,3\%$), elevando correspondentemente a taxa de contagem em relação à que seria obtida em materiais secos de mesma densidade. Mais precisamente falando, esse efeito é devido à presença do hidrogênio na molécula de água. O problema pode ser melhor analisado considerando-se alguns casos extremos, como foi feito por PREISS (1965)³⁸ em relação ao concreto. Este autor apresentou a Tab.II.5, de casos extremos de fator água-cimento para concretos com vários tipos de agregados graúdos, calculando para os mesmos os correspondentes fatores β_c . Primeiramente pode-se depreender que a variação em β_c , com a mudança na composição química devida a vários tipos de agregados graúdos, é bem pequena, sendo de, no máximo, 1%. Em relação à influência da água a situação se revela um pouco mais desfavorável, com o fator

de dispersão Compton β_c apresentando um incremento máximo de 2,4%, a partir da mesma Tab.II.5, onde os teores de umidade dos concretos variam de 3 ($x = 0,3$) a 32% ($x = 0,8$). Na verdade estes valores x do fator-água cimento são realmente extremos, com o que o incremento máximo em β_c acima referido dificilmente ocorrerá, uma vez que a calibração da sonda no concreto pode (e deve) ser feita para um fator água-cimento médio ou suficientemente próximo daquele que se espera encontrar na prática. Logo, assim procedendo, a umidade no concreto não afetaria a seção de choque Compton σ (eq.II.12) de maneira significativa, com a correspondente variação da taxa de contagem - e portanto da densidade - podendo ser desprezada.

No caso da determinação da densidade aparente de solos a maior ou menor presença de água pode levar a erros já significativos na determinação da densidade, uma vez que o teor de umidade nos solos pode variar bastante. Considerando-se um valor de 0,500 para o fator β_c dos solos secos em geral (Tab.II.4) e uma argila mole muito orgânica típica, com um teor de umidade segundo TERZAGHI e PECK (1962)⁵³ de 110% , conclui-se que a presença de água traria para β_c um incremento de 5,8% (de 0,500 para 0,529). Um dos procedimentos para superar esse problema seria o de se obter a umidade do solo de algum modo (inclusive por uma sonda nuclear à base de nêutrons; ver, por exemplo, PLATA, 1972)³⁷ . Feito isto poder-se-ia entrar com as taxas de contagem em curvas de calibração construídas com materiais em diversas umidades, sendo uma curva para cada umidade, obtendo-se então as densidades corretas. No entanto pode haver dificuldades na obtenção de materiais em várias umidades. Um procedimento alternativo é o de se obter através do ajuste da eq.III.13 uma curva de calibração apenas para materiais

secos, por exemplo, para uma composição química média dos mesmos (BALLARD e GARDNER, 1965) ³. Após, como os parâmetros a, b e c determinados no ajuste, pode-se calcular novas curvas de calibração para várias umidades. Obtidas a umidade do solo em questão e a taxa de contagem no mesmo utiliza-se a curva de calibração correspondente para a determinação da densidade desejada.

Para a verificação da integridade de estacas escavadas uma maior presença de água no concreto, seja por perda da argamassa, intrusão de solo saturado ou lama bentonítica, além de diminuir a densidade elevando assim a taxa de contagem incrementa esta adicionalmente, conforme já explicado. Tal efeito é até mesmo desejável, pois aumenta a sensibilidade da sonda a defeitos desse tipo embora com algum prejuízo na acurácia da densidade do material, que seria obtida um pouco inferior à real (curva de calibração com inclinação negativa). Esse erro, no entanto, é de importância secundária na verificação da integridade.

Diferentemente do que ocorre para o efeito Compton, a composição química afeta, e muito, a ocorrência do efeito fotoelétrico. A probabilidade de ocorrência deste por átomo é medida pela chamada seção de choque fotoelétrica por átomo, \mathcal{T}_a , dada aproximadamente por (BALLARD e GARDNER, 1965) ³ :

$$\mathcal{T}_{ai} = K \cdot \frac{Z_i^5}{E^{3,5}} \quad (\text{II.15})$$

para cada elemento químico de número atômico Z_i e massa atômica A_i constituinte do material considerado. K é uma constante e E a energia do fóton gama. Vê-se, pelos expoentes na Eq.II.15, que \mathcal{T}_a diminui rapidamente para fótons de energia elevada, sendo além disso bastante dependente da composição química.

À semelhança do que foi feito para a interação Compton deduz-se a seção de choque macroscópica para o efeito fotoelétrico, ou coeficiente de absorção linear fotoelétrica, \mathcal{T} :

$$\mathcal{T} = K_2 \cdot \rho \cdot \sum p_i \frac{Z_i^5}{A_i} \quad (\text{II.16})$$

Este parâmetro é diretamente proporcional à densidade que se deseja medir, inversamente proporcional à potência 3,5 da energia do fóton, incluída em K_2 , e diretamente proporcional ao fator de absorção fotoelétrica β_p , dado por

$$\beta_p = \sum p_i \frac{Z_i^5}{A_i} \quad (\text{II.17})$$

O parâmetro β_p mostra que o efeito fotoelétrico é bastante dependente da composição química, dado que, embora o quociente Z/A seja essencialmente constante, Z^5/A é fortemente aumentado por elementos pesados, com número atômico Z elevado. Tais elementos, segundo a Tab.II.3, são, no caso dos solos, o ferro, o cálcio e o potássio, em ordem decrescente de importância. Eles, portanto, aumentam a absorção fotoelétrica, diminuindo correspondentemente a taxa de contagem em relação à que seria obtida com elementos mais leves em seu lugar, mesmo que a densidade permanecesse constante.

A Tab.II.4 serve para dar uma boa idéia da variação que se pode esperar em β_p e, portanto, da importância de composição química na ocorrência do efeito fotoelétrico. A mesma tabela serve ainda para mostrar que a influência da presença de água na absorção fotoelétrica é grande, agindo no sentido de diminuí-la e concorrendo assim para elevar a taxa de contagem, ao contrário dos elementos pesados acima citados. Vê-se então que a umidade incrementa a taxa de contagem

não só por aumentar a probabilidade de interação Compton, como já visto - uma vez que apenas os fótons dispersados são detetados -, mas também por diminuir a possibilidade dos mesmos serem absorvidos - ao reduzir β_p e, por consequência, a seção de choque fotoelétrica, \mathcal{T} .

Reportam BALLARD e GARDNER (1965)³ que tem sido obtidos desvios padrões de até 0,16 ($\cdot 10$ pcf) na densidade de solos, erros estes devidos à diferença de composição química entre os materiais de calibração e os de campo. Considerando-se que a faixa de densidades aparentes de solos se estende aproximadamente de 1,3 a 2,0, o erro na densidade variará respectivamente de 24,6 a 16,0%, para um erro absoluto de dois desvios padrões (0,32). Tais erros, de fato, se mostram inadmissíveis em uma determinação de densidade.

Para solucionar esses problemas BALLARD e GARDNER (1965)³ sugerem o ajuste da eq.III.13 a pontos correspondentes a taxas de contagem obtidas em corpos de prova padrões, com densidade e composição química conhecidas. Determinados os parâmetros a, b e c da referida equação os mesmos seriam utilizados no cálculo de curvas de calibração para os solos a serem ensaiados, dos quais se deverá determinar a composição química para o cálculo dos parâmetros C e P. Os autores se referem a ótimos resultados práticos. No entanto esse procedimento exige a análise química dos materiais, o que sem dúvida é uma fonte de dificuldades.

Providências mais abrangentes, e portanto mais adequadas, dispensam totalmente a análise química e consistem em selecionar, para que sejam detetados, apenas fótons dentro de uma faixa de energia na qual praticamente não

ocorre o efeito fotoelétrico, este essencialmente a fonte dos erros devidos à composição química. Pode-se compreender melhor esse procedimento observando-se a Fig.II.29, que fornece as seções de choque fotoelétrica e Compton por átomo em função da energia do fóton, para um átomo de características médias (Z e A), representativo de solos e concretos. A partir da mesma conclui PREISS (1966)³⁹ que para energias acima de 0,2 MeV o efeito Compton é o único processo de interação efetivo, sendo a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico desprezível. Portanto, ainda que esse limiar de energia varie em certo grau com o número atômico médio Z do material, crescendo com este, nas suas vizinhanças a absorção fotoelétrica é tão pequena que variações da mesma por mudanças na composição química não causarão alterações sensíveis na taxa de contagem. Segundo CZUBEK (1965)⁶ devem ser detetados apenas os fótons de energia acima de um limiar para o qual se tenha uma razão entre as seções de choque fotoelétrica τ e Compton σ dada por

$$\frac{\tau_a}{\sigma_a} \text{ ou } \frac{\tau}{\sigma} \leq 0,01 \quad (\text{II.18})$$

Segundo o mesmo autor tal acontece, quando $Z_{eq} \approx 17$ (eq.III.12), para energias acima de 0,25 a 0,30 MeV e, para $Z_{eq} \approx 22$ ou maior, quando a energia do fóton detetado está acima de 0,40 MeV.

Para registrar apenas os fótons com energias acima de um determinado valor, pode-se utilizar um detector de cintilação associado a um discriminador de energia dos pulsos (provenientes dos fótons detetados), com a discriminação ajustada para um limiar igual a algum dos acima sugeridos. Outra alternativa, conforme PREISS (1966)³⁹, é se utilizar um detector Geiger-Müller com um filtro de ferro que o envolva, cuja espessu

ra deve ser calculada para absorver os fótons com energia abaixo do limiar adotado. Segundo a Fig.II.29, no caso de solos e concreto tudo indica que um limiar de 0,20 MeV seja suficiente para minimizar a ocorrência de absorção fotoelétrica a um ponto que, mesmo havendo variações dessa absorção devido à composição química, tais variações não causem erros significativos na taxa de contagem e nem, portanto, na densidade.

As providências acima apontadas são de grande importância para se evitar erros na taxa de contagem e na densidade devidos à composição química, uma vez que só são detectados os fótons dispersados após as colisões Compton e que chegam ao detetor com uma energia E_i , inferior à energia inicial E_0 dos fótons primários. A energia E_i , após a colisão i , se relaciona à energia anterior E_{i-1} (de após a colisão $i-1$), através da expressão (PREISS, 1966)³⁹:

$$E_i = \frac{E_{i-1}}{1 + \frac{E_{i-1}}{0,511}(1 - \cos \theta)} \quad (\text{MeV}) \quad (\text{II.19})$$

onde θ é o ângulo entre as trajetórias do fóton de antes e de depois da colisão i (Fig.III.2b). Por exemplo, para um fóton de 1,33 MeV do Co^{60} , uma única dispersão de 90° diminuiria a sua energia para 0,37 MeV. Como para o Co^{60} e um concreto de $\rho = 2,2$ TOBIO (1967)⁵⁵ calcula a seção de choque Compton σ igual a $0,14 \text{ cm}^{-1}$ para os fótons primários (não dispersados), segundo a eq. II.13 vê-se que o caminho livre médio dos mesmos nesse material é de cerca de 7 cm, o que praticamente obriga que um fóton para que seja detetado sofra várias deflexões. Portanto, a taxa de contagem é constituída na sua maioria parte de fótons de baixa energia e cuja absorção pode ser influenciada de maneira significativa pela composição química, o que introduz os erros já mencio

nados na taxa de contagem e densidade. Desse modo a consequência da adoção de um limiar de energia, para a detecção apenas de fótons com energia acima do mesmo, é causar uma grande diminuição da taxa de contagem, o que muitas vezes introduz erros significativos de flutuação estatística da radioatividade no caso de detetores Geiger-Müller com filtros. Essa dificuldade pode ser superada ao se adotar um detetor de cintilação (associado a um discriminador), cuja eficiência é muitas vezes superior à dos tubos Geiger-Müller (item 2.3.4.3b). No entanto, no projeto de uma sonda ambas as alternativas devem ser estudadas, uma vez que os detetores Geiger-Müller são simples, baratos e mais resistentes.

Portanto as providências acima citadas são as que se deve tomar no sentido de evitar erros significativos na determinação da densidade, devidos a diferentes composições químicas.

Porém, no caso da verificação da integridade, os erros na taxa de contagem provocados por diferenças na composição química entre os materiais de campo e os da calibração são menos importantes. A integridade pode ser avaliada comparando-se a variação relativa nas taxas de contagem da estaca com variações relativas nas taxas de corpos de prova com defeitos simulados, estas avaliadas em relação à taxa obtida em um corpo de prova sem defeito. Pode-se, assim, concluir a respeito da integridade do fuste sem a necessidade de medir a densidade do material que o constitui. No entanto, não se pode deixar de admitir que uma medida da densidade do concreto é sempre interessante, e, para se obter um valor mais acurado, deve-se adotar as providências acima apontadas.

2.3.4.7 - Vantagens e Desvantagens da Sondagem Gama

Vantagens:

- 1- O ensaio pode ser iniciado tão logo termine a concretagem, já que não é necessário esperar que o concreto endureça e ganhe resistência para a sua realização.
- 2- Os resultados não exigem habilidade especial na sua interpretação, que é razoavelmente fácil e rápida.
- 3- A operação do equipamento é simples e não exige mais de duas pessoas.
- 4- O equipamento é plenamente portátil, podendo-se realizar o ensaio com um mínimo de espaço ao redor da estaca.
- 5- O método pode ser aplicado a estacas escavadas com qualquer forma de seção transversal, bem como a paredes moldadas no solo. Pode-se ensaiar ao longo de toda a profundidade da estaca ou parede, praticamente sem limitação, desde que se preveja comprimento suficiente para os tubos de acesso e cabo da sonda.
- 6- Os defeitos percebidos são localizados em profundidade com precisão mais do que suficiente para se decidir sobre as providências corretivas.
- 7- Os resultados estão disponíveis para análise à medida que o ensaio é realizado, o que habilita o método a que seja aplicado inclusive como um controle de qualidade do concreto durante a própria concretagem, permitindo decisões rápidas se a mesma estiver se desenrolando de maneira não satisfatória. Ainda que tal utilização do método tenha sido preconizada por PREISS (1971)⁴¹ e PREISS e CAISERMAN (1975)⁴² não há referências de que tenha sido, de fato, levada a cabo, embora seja tecnicamente exequível.
- 8- A sonda nuclear é o único método capaz de verificar se há um a-

dequado cobrimento da armação da estaca, o que pode ser feito com uma sonda colimada e cujo raio de influência seja, de preferência, um pouco maior que o cobrimento.

- 9- O método é rápido. PREISS et alii (1978)⁴³ se referem ao ensaio de 20 a 30 tubos de 20m de comprimento por dia normal de trabalho. Isto, na base de 3 ou 4 tubos por estaca, daria na pior das hipóteses 5 estacas/dia e, na melhor, 10 estacas/dia. Essa estimativa, no entanto, parece algo exagerada quando se utiliza uma única sonda (ver item 7.1).
- 10-Praticamente não há limitação de profundidade para o ensaio , bastando que se adote para a sonda um cabo com 50 ou 60m de comprimento.
- 11-O método se mostra capaz de ensaiar estacas escavadas com arrasamento abaixo do nível do terreno, desde que os tubos de acesso se prolonguem até a superfície.
- 12-Segundo os autores consultados a sensibilidade do método é bastante razoável, podendo-se perceber qualquer defeito significativo no caminho dos tubos. Pode-se detetar também defei - tos relativamente pequenos.

Desvantagens:

- 1- O método requer a preparação prévia da estaca, com a previsão de tubos de acesso no fuste.
- 2- A área ensaiada ao redor do tubo de acesso é relativamente pequena, indo de cerca de 500 a 800 cm², conforme característi - cas da sonda. Isso exige que se providencie vários tubos de acesso, de modo a aumentar as chances de detetar uma falha que venha a ocorrer no concreto. Portanto, à medida que o diâme - tro da estaca aumenta é necessário elevar o número de tubos de acesso para que se consiga uma verificação adequada da se - ção.

- 3- Dentro do raio de influência a sensibilidade a um defeito diminui com a distância do mesmo ao tubo de acesso, visto que o fluxo de fótons também decresce à medida que se desloca por regiões mais afastadas do tubo.
- 4- Descontinuidades ou juntas frias de pequena espessura não são detetadas pela sonda (PREISS et alii, 1978) ⁴³.
- 5- O método não é capaz de indicar como um defeito encontrado a feterá o comportamento da estaca.
- 6- Nas estacas com seção fortemente armada os tubos de acesso podem contribuir para aprisionar o concreto entre os ferros, dificultando o cobrimento destes.
- 7- Os custos da sondagem gama são algo elevados, comparáveis aos do ensaio sônico (WELTMAN, 1977) ⁵⁹.
- 8- Devido à posição dos tubos de acesso, presos à armação, tanto esta como a porção de solo abrangida pelo volume de influência podem dificultar em certa medida a interpretação das taxas de contagem obtidas. Contudo este problema pode ser contornado com as providências sugeridas no item 2.3.4.6d.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 - Princípios de Radioatividade

3.1.1 - Fundamentos

Ressalta PLATA (1972)³⁷ que uma mesma espécie de núcleo radioativo pode emitir uma ou mais das 3 radiações abaixo, consideradas principais:

- a) partículas alfa, constituídas por 2 prótons e 2 nêutrons associados, possuindo assim a mesma estrutura do núcleo do hélio. São portanto animadas de 2 cargas elétricas positivas elementares, encerrando 4 unidades de massa atômica. Frequentemente são designadas pela própria letra grega alfa (α).
- b) Partículas beta, que são, principalmente, elétrons de alta energia oriundos do núcleo. São assim chamados para serem diferenciados daqueles elétrons provenientes da coroa ou envoltória eletrônica, menos energéticos. Nomeadas muitas vezes pela própria letra grega beta (β), são partículas de massa muito pequena e carga elétrica negativa unitária.
- c) Raios gama, da letra grega gama (γ), que são radiações eletromagnéticas, as quais constituem-se de fótons. Um fóton, portanto, é um quantum de energia de radiação eletromagnética. Por sua vez, quantum é toda quantidade elementar, indivisível, que intervém na quantificação de um sistema de corpúsculos. É um vocábulo latino que significa quanto e cujo plural é quanta.

PLATA (1972)³⁷ esclarece que nuclídeo é o termo empregado para nomear qualquer espécie atômica, caracterizada por

possuir mesmo número de nêutrons e de prótons, isto é, uma mesma estrutura nuclear.

Segundo o IPR (1968) ²¹ os radionuclídeos emissores de alfa ou de beta, após a emissão de uma ou mais partículas de um destes dois tipos, podem cair não no estado fundamental, mas num estado energético intermediário, dito excitado. O núcleo passa, em seguida, ao estado fundamental ou a outro estado excitado inferior (menos energético) através da emissão de um raio gama (um fóton). Nesta última hipótese sucessivos raios gama são emitidos até que o núcleo se torne estável. Para cada radionuclídeo esses raios possuem uma energia inicial E_0 característica. É exatamente este processo que ocorre com o césio 137 (número de massa 137) e, também, com o cobalto 60, utilizado nesta pesquisa. Ambos são emissores de partículas beta e, como consequência, de raios gama. Na maioria das sondas radioativas à base de raios gama, usadas para a medida de densidade de solos, rochas ou concretos, a fonte radioativa é o césio 137, embora em alguns casos também se utilize o cobalto 60. Essas fontes, explica PLATA (1972) ³⁷, emitem os fótons gama com diferentes energias iniciais E_0 : 0,66 MeV para o césio e 1,17 e 1,33 MeV para o cobalto ($1\text{MeV} = 10^6 \text{ ev}$).

Em Física Atômica, para quantificar a energia das partículas subatômicas, e em face das unidades de energia comuns (erg, joule, etc) serem muito grandes para este fim, adotou-se como unidade de energia o elétron-volt (ev). Esta é a energia cinética adquirida por um elétron quando acelerado, sem resistência, através de uma diferença de potencial de 1 volt.

Os raios gama são uma radiação eletromagnética, assim como a luz visível, os raios infravermelhos e ultravioletas, os raios X, etc. Explicam FELTRE e SETSUO (1970) ¹¹ que

as radiações eletromagnéticas nada mais são do que ondas eletromagnéticas, as quais apresentam os comprimentos de onda dentro de uma vasta gama de variação. Dentro de cada faixa de variação a onda eletromagnética recebe um nome específico, como os acima citados. As ondas eletromagnéticas são constituídas de um campo elétrico e um campo magnético ortogonais, senoidais e em fase, de mesma frequência ν e que vibram transversalmente ao sentido de propagação da onda. Isto pode ser visualizado esquematicamente na Fig.III.1, através dos vetores campo elétrico (E) e campo magnético (B). No entanto, em certos fenômenos como o fotoelétrico, comentado no item seguinte, tudo se passa como se a energia da onda estivesse localizada em espaços muito reduzidos, semelhantes a pacotes ou porções descontínuas de energia. Einstein em 1905 chamou estes pacotes de fótons, formulando a hipótese de que os mesmos se comportam como projéteis, capazes de provocar nos seus choques contra os átomos efeitos similares aos do bombardeamento por corpúsculos subatômicos (elétrons, nêutrons, etc). Um fóton, portanto, é um quantum de energia de radiação ou onda eletromagnética. Pode ser comparado a uma "partícula" dessa radiação, de frequência característica, sem carga elétrica, de massa no repouso nula e que se movimenta no vácuo à velocidade da luz (300.000 Km/s). A energia E de um fóton é dada pela equação (LEÃO, 1988)²³ :

$$E = h \cdot \nu \quad \text{(III.1a)}$$

onde h é a constante de Plank ($h = 6,6252 \times 10^{-34}$ joule.s) e ν é a frequência do fóton, vale dizer, da radiação por ele constituída.

3.1.2 - Interação da Radiação Gama com a Matéria

Qualquer radiação ao atingir a matéria possui uma probabilidade muito maior de interagir com os elétrons dos átomos do que com os núcleos. Isto porque os diâmetros dos átomos são de 10.000 a 100.000 vezes maiores que os diâmetros dos núcleos. Quando em uma interação um elétron é arrancado de um átomo formando-se um par de íons (o elétron e o átomo agora positivo) o fenômeno é chamado de ionização.

Possuindo os fótons gama carga elétrica nula, a interação dos mesmos com os elétrons não pode se dar através de forças eletrostáticas, como no caso das partículas alfa e beta, mas apenas por meio de colisões diretas com os elétrons orbitais. Por serem os fótons animados de altíssima velocidade e, portanto, permanecerem tempos muito curtos nas proximidades de um átomo, essas interações por colisão acontecem menos vezes que no caso de partículas maiores, mais lentas e carregadas (alfa e beta). Como consequência vem que os raios gama produzem poucas ionizações por unidade de comprimento de percusso. Isto equivale a uma grande penetração no material, até que o fóton tenha toda sua energia absorvida em um número suficiente de colisões com elétrons. Daí as radiações gama serem bem mais penetrantes que as radiações alfa e beta.

Há três processos pelos quais as radiações gama interagem com a matéria: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares.

No efeito fotoelétrico o fóton incidente sofre um colisão inelástica com um elétron, cedendo ao mesmo toda a sua energia e desaparecendo tão logo ocorra o choque. Uma representação do fenômeno está na Fig.III.2a. Explica o IPR (1968)²¹

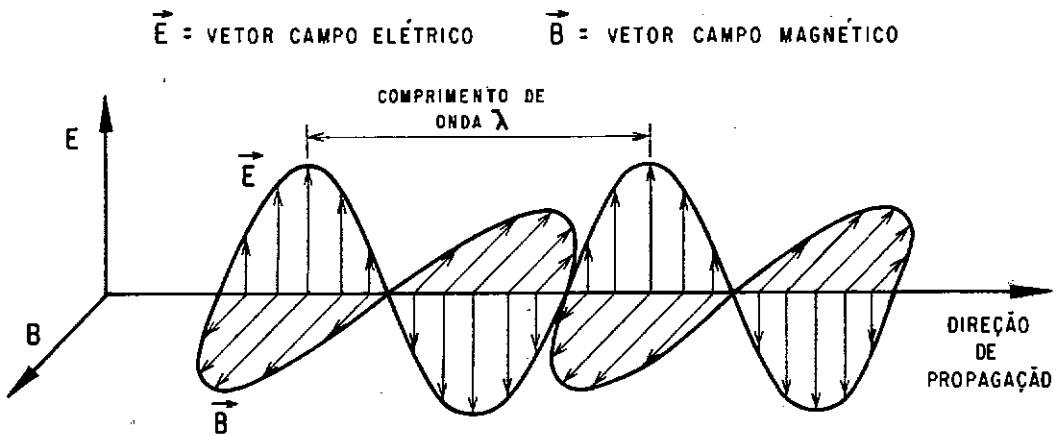
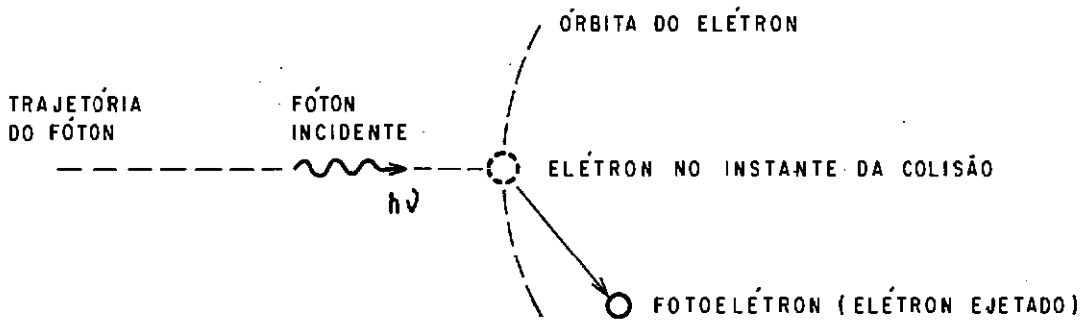
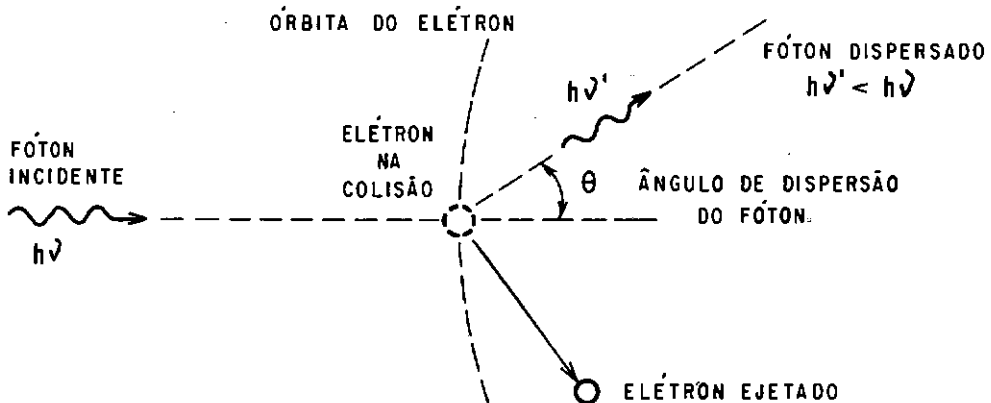


Fig. III.1 - Representação de uma onda eletromagnética de radiação gama.
(FELTRE e YOSHINAGA, 1970)¹¹



(a) - Efeito fotoelétrico: colisão inelástica entre um fóton e um elétron. O fóton deixa de existir.

FIGURA III.2



(b) - Efeito Compton: colisão elástica de um fóton com um elétron, sendo o fóton dispersado com menor energia.

que para ocorrer o efeito fotoelétrico a energia do fóton não pode ser elevada, uma vez que toda essa energia deve ser absorvida pelo átomo que, como consequência, emite o elétron envolvido. Portanto, átomos mais pesados, com número atômico elevado, são mais capazes de absorver fótons dessa maneira, inclusive fótons de maior energia.

Esclarece a IAEA (1971)²⁰ que a probabilidade de absorção fotoelétrica, para a maioria dos minerais formadores das rochas (Tab.II.3), é alta para baixas energias (~ 50 Kev), tornando-se desprezível para energias de fótons acima de 200 Kev. O elétron ejetado do átomo neste processo é chamado fotoelêtron, sendo a energia dos fótons gama sempre suficiente para excitar fotoelétrons. O fenômeno obedece à equação de Einstein para o efeito fotoelétrico (PAULING, 1966)³³ :

$$h.\nu = E_i + \frac{1}{2} mv^2 \quad (III.1)$$

onde $h.\nu$ é a energia do fóton incidente, E_i a parcela da energia do fóton necessária para arrancar o elétron de um átomo do material (energia de ionização do material) e o termo restante é a energia cinética do elétron ejetado (Fig.III.2a).

Para a faixa dos fótons de média, energia, de 200 Kev a 5 Mev segundo a IAEA (1971)²⁰, e para os elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre (Tab.II.3), o processo de interação predominante é o chamado efeito Compton ou espalhamento Compton. Portanto, como lembra PLATA (1972)³⁷, para os raios gama emitidos pelo césio 137 (0,66 Mev) e pelo cobalto 60 (1,17 e 1,33 Mev), que possuem energias intermediárias, o processo de interação mais provável com os minerais de uma rocha é a interação Compton. Este fenômeno está esquematizado na Fig.III.2b. O fóton so

fre colisão elástica com um elétron, cedendo-lhe parte de sua energia e arrancando-o do átomo, ao mesmo tempo em que sofre uma mudança de direção em sua trajetória prosseguindo com menor energia. Diz-se, então, que o fóton foi dispersado. O efeito Compton, por ocorrer com elétrons de órbitas externas, isto é, pouco ligados ao átomo, é independente do número atômico do elemento químico, dependendo, apenas, como já foi dito, de que os fótons sejam de energia intermediária (PLATA, 1972)³⁷. Aí, sim, há predominância deste processo. A equação do fenômeno, pelo princípio da conservação da energia, é:

$$h.\nu = h.\nu' + E_i + \frac{1}{2} m.v^2 \quad (\text{III.2})$$

onde $h.\nu'$ é a energia do fóton dispersado e os demais termos tem o mesmo significado que no efeito fotoelétrico.

Quando os fótons incidentes são de energia acima de 5 MeV passa a predominar o processo de interação da produção de pares. Evidentemente este processo é bastante difícil de ocorrer para os fótons do cobalto 60 e césio 137, pelo que não interessa ao presente trabalho.

3.1.3 - Lei Fundamental da Radioatividade

Esclarece LEÃO (1980)²³ que o fenômeno radioatividade está relacionado única e exclusivamente com a estrutura do núcleo, isto é, com a relação entre o número de nêutrons e o número de prótons. A relação nêutron/próton é, em primeira aproximação, um critério para se saber se um dado nuclídeo é radioativo ou estável, sendo, portanto, uma indicação do seu nível energético. Os radionuclídeos têm, geralmente, esta relação maior do que 1,4 enquanto os nuclídeos estáveis a possuem muito próxima de 1. É justamente por estar energeticamente excitado que um

ou mais isótopos dos possíveis a partir de um mesmo elemento químico podem ser radioativos, enquanto o ou os restantes não o são. Portanto, a condição para que um dado núcleo emita radiação é que ele esteja em um nível energético acima do mínimo, que corresponde ao seu estado fundamental ou estável. Porém, mesmo que esta condição seja satisfeita, isto é, mesmo que o nuclídeo possua o potencial necessário, é impossível prever quando ocorrerá a desintegração. Os núcleos, sob este e muitos aspectos, permanecem insondáveis. É por isso que se diz que a desintegração radioativa é um fenômeno espontâneo (PLATA, 1972)³⁷, sem ser gratuito. Assim, em uma amostra de um radioisótopo as desintegrações se dão ao acaso, seguindo, portanto, leis estatísticas (itens 3.4 e 3.5). Mesmo que não se possa precisar o instante em que um átomo isolado se desintegrará, para uma amostra que mesmo sendo de algumas gramas possui milhões de átomos, pode-se prever, dentro dos erros estatísticos, quantos sofrerão a desintegração na unidade de tempo. É o que passa a ser explicado em seguida.

Seja N o número de átomos radioativos presentes inicialmente em uma amostra de certo radioisótopo. Tal número diminui ao longo do tempo, dado que um átomo após emitir sua radiação ou conjunto de radiações não volta a fazê-lo. Portanto o número de átomos radioativos diminui de ΔN (ocorrem ΔN desintegrações) no intervalo de tempo Δt , isto é, diminui de dN no infinitésimo de tempo dt . A expressão diferencial $-dN/dt$ configura uma grandeza denominada de desintegração ou atividade (A) da fonte radioativa, que ao ser medida é dada, por exemplo, em contagens (ou desintegrações) por minuto (cpm). Para se obter a atividade, na prática, conta-se o número de desintegrações na unidade de tempo, $-\Delta N/\Delta t$. O sinal negativo é para que a atividade fique definida como uma grandeza positiva visto que, como o número de áto-

mos radioativos diminui com o tempo, o valor ΔN é intrinsecamente negativo.

Verificou-se experimentalmente que a atividade depende do número inicial N de átomos radioativos presentes. Como N diminui ao longo do tempo é fácil entender que o número de desintegrações ΔN também diminui no tempo. Em outras palavras, a atividade decresce constantemente. Para caracterizar esse decréscimo contínuo escolheu-se arbitrariamente o período de tempo ao fim do qual a atividade se reduz à metade (Fig.III.3). É o dito período de semidesintegração ou meia-vida ($T_{\frac{1}{2}}$), que se verificou ser constante e característico para cada radioisótopo. Concluiu-se daí que a fração do total de átomos que se desintegra na unidade de tempo é, também, sempre constante e característica do isótopo em questão. Esse valor é chamado de constante de desintegração do radioisótopo, sendo comumente representado pela letra grega lâmbda (λ). Já que a constante de desintegração é a redução fracionária dos átomos radioativos na unidade de tempo ($-dN/N \cdot dt$) tem-se para a atividade ($-dN/dt$):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (\text{III.3})$$

Vê-se, portanto, que a atividade é diretamente proporcional ao número N de átomo radioativos presentes.

A equação acima pode ser escrita da forma:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad \therefore \quad \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

Integrando-se:

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \therefore \quad \ln(N_t/N_0) = -\lambda t \quad \therefore$$

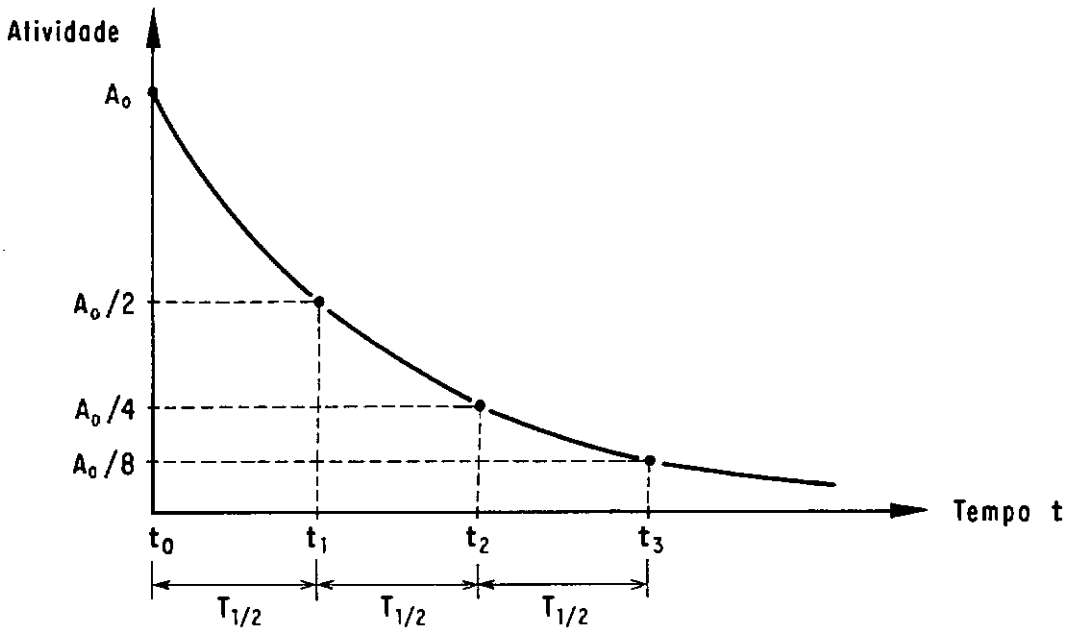


Fig. III.3 - Descaimento de uma fonte radioativa de atividade inicial A_0 e meia-vida igual $T_{1/2}$. (FELTRE e YOSHINAGA, 1970)¹¹

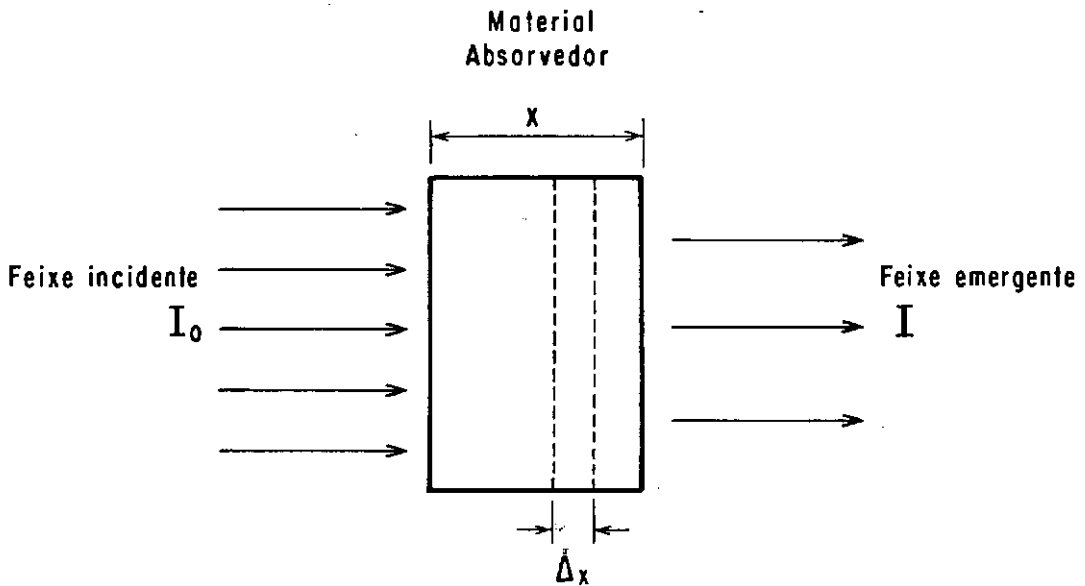


Fig. III.4 - Atenuação em um feixe de radiação quando atravessa a matéria: sua intensidade diminui, isto é, $I < I_0$ (IPR, 1968)²¹

$$\therefore N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{III.4})$$

Esta é a chamada equação ou lei fundamental da radioatividade. Descreve a maneira como o número de átomos radioativos após transcorrido o tempo t (N_t) se relaciona com o número inicial destes átomos (N_0).

Posto que a atividade (A) é diretamente proporcional ao número de átomos radioativos no instante considerado (eq. III.3) pode-se escrever:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{III.5})$$

Esta equação é a forma mais utilizada para se expressar a lei fundamental da radioatividade.

A unidade de atividade é o curie (Ci), equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo. Portanto 1 curie de certo radioisótopo corresponde a uma quantidade dessa substância tal que $3,7 \times 10^{10}$ átomos se desintegram por segundo. É comum o uso de submúltiplos, como o milicurie (mCi) e o microcurie (μCi). Pode-se dizer que a atividade é uma medida da intensidade da fonte radioativa.

3.1.4 - Absorção de Radiação Gama pela Matéria

Quando um feixe de radiação de intensidade I_0 (número de raios na unidade de tempo) incide sobre um material de espessura x (o absorvedor) verifica-se que, após atravessar o corpo, o feixe prossegue com intensidade I , menor do que I_0 (Fig.III.4). Uma parcela ΔI dos fótons é absorvida pelo material através de uma combinação dos três processos de interação da radiação gama com a matéria, já comentados.

Supondo o absorvedor feito de material homogêneo , em uma distância Δx tomada em qualquer parte ao longo do percurso o feixe incidente é atenuado de ΔI . Observou-se que a atenuação ΔI é diretamente proporcional:

- 1- à intensidade I do feixe incidente, para uma espessura constante do absorvedor;
- 2- a Δx , para um valor constante da intensidade I do feixe.

Assim, para um percurso infinitesimal dx no absorvedor:

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dx \quad \therefore \quad \frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx$$

O sinal negativo é para que não se defina o coeficiente de proporcionalidade μ como uma constante negativa, dado que dI é sempre menor do que zero.

Integrando-se:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\mu \cdot \int_0^x dx \quad \therefore \quad \ln(I/I_0) = -\mu \cdot x \quad \therefore$$

$$\therefore \quad I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad \text{(III.6)}$$

Esta equação é a lei de absorção ou atenuação da radiação pela matéria, qualquer que seja a radiação. Explica o IPR (1968)²¹ que a constante μ é o chamado coeficiente de absorção linear total, expresso em cm^{-1} . É a redução fracionária da intensidade da radiação por unidade de espessura do absorvedor. Depende tanto do material absorvedor como do tipo e energia da radiação incidente.

Ainda segundo a mesma fonte, o coeficiente de absorção mássico M é bastante utilizado nos estudos de absorção. É definido como a relação entre o coeficiente de absorção linear

total μ e o peso específico ρ do absorvedor, isto é, $M = \mu / \rho$.
A lei de absorção fica então como abaixo:

$$I = I_0 \cdot e^{-M \cdot \rho \cdot x} \quad (\text{III.7})$$

O coeficiente de absorção mássico M tem a vantagem de independer do peso específico do material absorvedor, dependen do apenas do seu número atômico Z e da energia dos fótons incidentes.

3.2 - O Raio de Influência da Sonda

Para uma sonda desprovida de colimadores (sonda não colimada) o volume de influência é, aproximadamente, o volume do elipsóide adjacente ao tubo de acesso (Fig.II.17), do qual são oriundos 95% dos fótons emitidos que, após uma ou mais deflexões, atingem o detetor (PLATA, 1972) ³⁷. Portanto, este volume é a porção de material efetivamente ensaiada, isto é, o volume de material do qual se obtem informações sobre sua densidade através da taxa de contagem medida.

Pela Fig.II.17 tem-se a impressão de que todos os fótons que chegam ao detetor o fazem percorrendo trajetórias planas, isto é, suas trajetórias e os eixos de simetria do detetor e da fonte (Fig.III.5) estão num mesmo plano. Isto só é verdade, aproximadamente, para aqueles fótons que sofrem apenas uma deflexão (fóton 1, Fig.III.5). Já os fótons que sofrem duas ou mais deflexões em seu caminho até o detetor podem ou não apresentar trajetórias planas (fótons 2 e 2' respectivamente, Fig.III.5). Na Fig.III.5, para que o desenho não ficasse sobrecarregado, foram mostrados apenas a fonte e o detetor, sendo omitidos os demais componentes da sonda e o tubo de acesso.

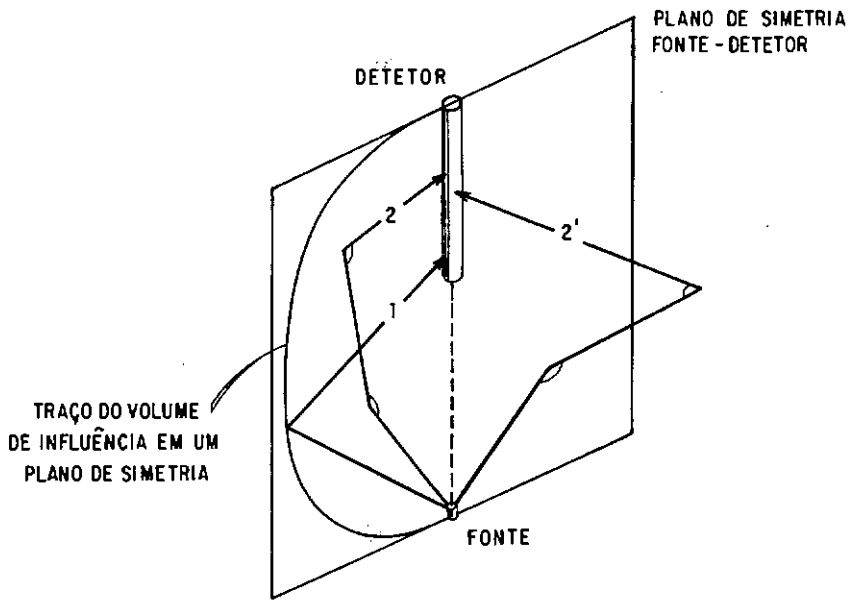


Fig. III.5

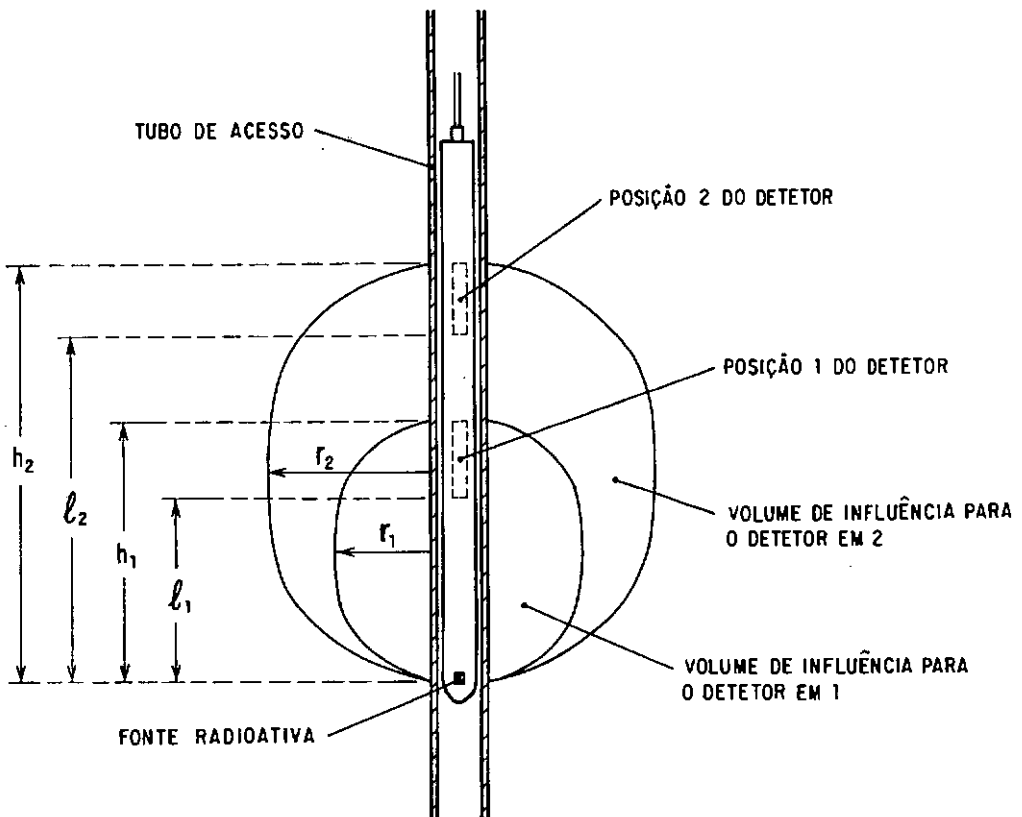


Fig. III.6 - O volume de influência e sua dependência da distância fonte - detector l .
 Para $l_2 > l_1 \Rightarrow r_2 > r_1$. (PLATA, 1972) ³⁷

A principal característica do volume de influência é o seu raio r (Fig.III.6), por determinar até que distância do tubo de acesso o material em estudo é efetivamente ensaiado. No entanto as informações a respeito disponíveis na literatura consultada são algo vagas. Referindo-se ao assunto PLATA (1972) ³⁷ aponta que para as sondas mais comuns, com fonte de cézio 137 e distância fonte-detetor 1 (Fig.III.7) de cerca de 24 cm, o raio de influência varia, aproximadamente, de 12 cm para a densidade de 2,5 a 20 cm para um material de densidade 1,5. DND e MACHIDA (1965) ³², ensaiando a água com uma fonte de cézio 137 e uma distância fonte-detetor de 8 cm, determinaram para esse material um raio de influência de pouco menos de 20 cm. Para os demais materiais ensaiados por estes autores, com densidade indo até quase 1,6, não foram fornecidos os correspondentes raios de influência. PREISS e CAISER - MAN (1975) ⁴², verificando a integridade de estacas escavadas com uma sonda à base de cézio 137, determinaram para o concreto um raio de influência de 10 cm, correspondente a uma altura do volume de influência de 25 cm, portanto com uma distância fonte-detetor abaixo desse valor. É preciso ressaltar que o raio de influência definido para uma sonda é aquele correspondente à distância ótima fonte-detetor, para a qual a sonda é montada para utilização por ser a geometria que otimiza o seu desempenho (item 6.5.1). Quanto à altura do volume de influência ela pode ser tomada para efeitos práticos como igual à distância h do extremo inferior da fonte ao extremo superior do detetor (Fig.III.6).

São três os principais fatores que afetam o raio de influência de uma sonda:

- a) a densidade do meio: o raio de influência diminui à medida que aumenta a densidade do material ensaiado;

- b) a distância fonte-detetor: o raio de influência aumenta com a referida distância, conforme a Fig.III:6;
- c) a energia inicial E_0 dos fótons gama: o raio de influência aumenta com E_0 .

a) Quanto à densidade do material.

Explica PLATA (1972) ³⁷ que o raio do volume de influência vem determinado, principalmente, pelo poder de penetração no meio tanto dos fótons primários, que ainda não sofreram interações, como dos fótons dispersados. À medida que aumenta a densidade aparente do meio este poder de penetração diminui, decrescendo por tanto o raio do volume de influência. Um exemplo elucidativo é o fornecido pelo mesmo autor no 3º parágrafo, acima.

Este fato pode ser melhor compreendido através de uma rápida análise da equação de absorção da radiação pela matéria (eq. III.7):

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Esta equação mostra que à medida que o peso específico μ do meio aumenta, diminui exponencialmente a intensidade I do feixe de radiação a uma profundidade de penetração x . Ou seja, diminui o poder de penetração da radiação considerada, diminuindo assim o raio do volume ensaiado.

b) Quanto à energia inicial E_0 dos fótons.

A energia inicial E_0 dos fótons é aquela com que são emitidos pela fonte radioativa, antes de interagirem com a matéria. Essa energia depende unicamente do radionuclídeo emissor. Por exemplo, o césio 137 emite fótons gama com energia inicial de 0,66Mev enquanto o cobalto 60 os emite com energias de 1,17 e 1,33 Mev (item 2.3.4.3d). Quanto maior a energia inicial E_0 maior o poder

de penetração dos fótons no material e, portanto, maior o raio de influência da sonda. Isto porque com maior energia o fóton tem menor possibilidade de ser absorvido fotoeletricamente e, também, maior possibilidade de subsistir a um número mais elevado de dispersões, razões que o fazem penetrar mais profundamente no meio. Pode-se, então, esperar que a mesma sonda possua um raio de influência algo maior com uma fonte de cobalto 60 no lugar de outra de césio 137.

c) Quanto à distância fonte-detetor:

O traço maior do volume de influência na seção transversal da estaca é uma área circular ao redor do tubo de aceso, que configura a área efetivamente ensaiada. Esta área abrange uma espessura de material em volta do tubo que é o já definido raio de influência da sonda, cujo valor aumenta com a distância fonte-detetor.

ONO e MACHIDA (1965)³² relatam resultados experimentais seus que ilustram muito bem a dependência do raio do volume ensaiado em relação à distância fonte-detetor. A sonda empregada pelos autores é a da Fig.III.7, sendo l_d o comprimento efetivo do detetor, no caso um contador G-M, e l_s o comprimento da blindagem, constituída de alguns cilindros de tungstênio com 2 cm de altura e 2,4 cm de diâmetro. A altura do volume de influência pode ser tomada como $h=l_d+l$, sendo l a distância fonte-detetor. Os autores centraram tubos de acesso em recipientes cilíndricos, de vários diâmetros e altura de 50 cm, que foram enchidos com água, utilizada como o material a ser ensaiado. Posicionada a sonda em cada recipiente foram medidas as taxas de contagem correspondentes aos diversos diâmetros para duas distâncias fonte-detetor distintas, con

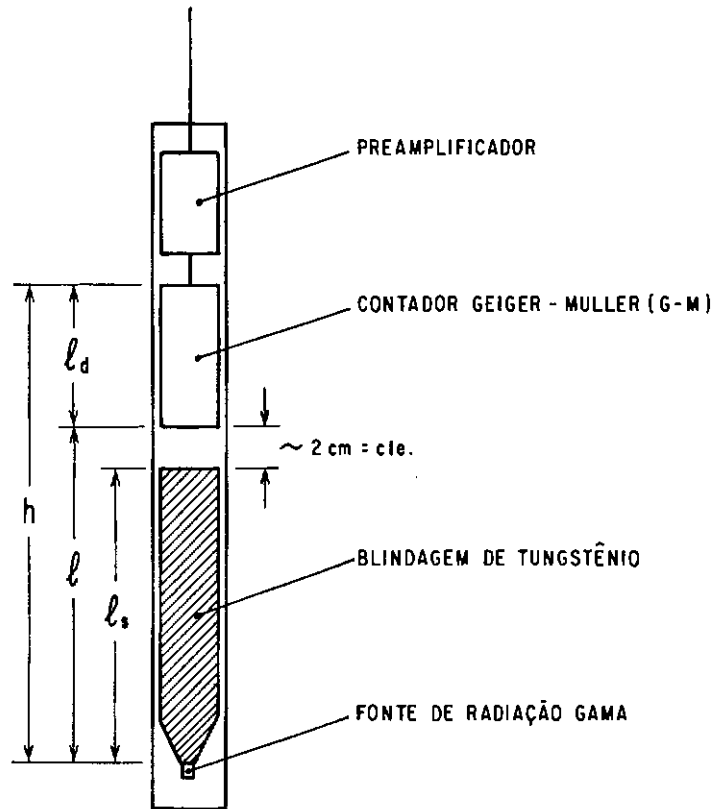


Fig. III.7 - Esquema da sonda de ONO e MACHIDA (1965).³²

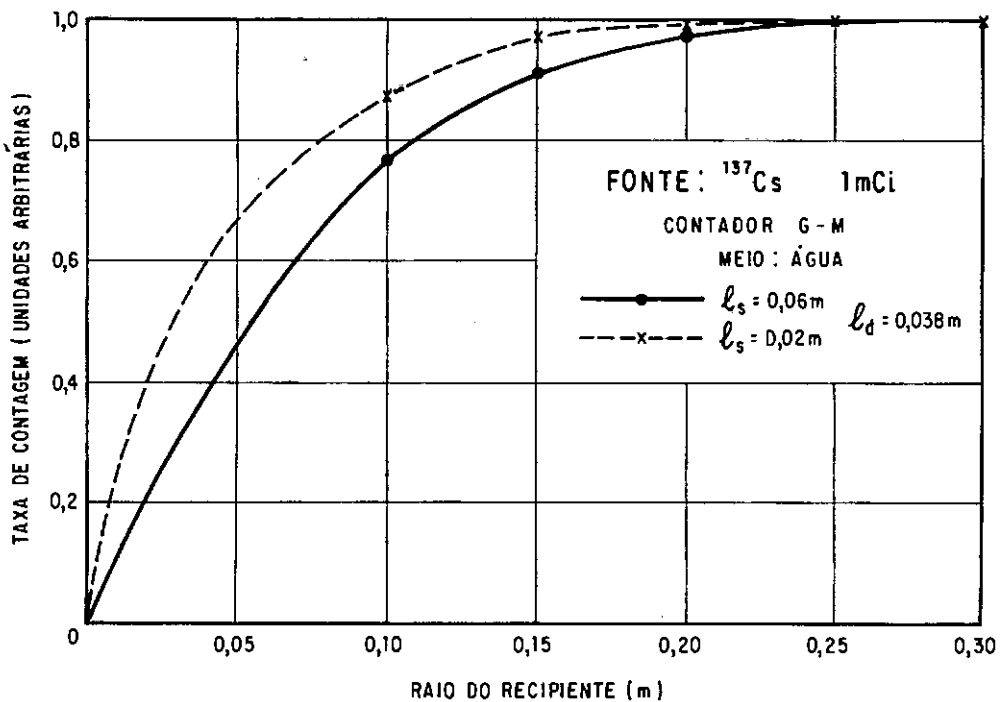


Fig. III.8 - Efeito do raio do recipiente na taxa de contagem relativa para a água.
FONTE: ONO e MACHIDA (1965)³²

seguidas com dois comprimentos de blindagem diferentes, $l_g=2$ e 6cm.

Os resultados, sob a forma de duas curvas, uma para cada distância fonte-detetor, estão na Fig.III.8. Nota-se que a partir de cerca de 25 cm de raio do recipiente as taxas de contagem para ambas as distâncias fonte-detetor tornam-se praticamente iguais. Para cada distância fonte-detetor há um raio do recipiente além do qual a taxa de contagem não aumenta mais do que 5%. Este raio é tomado como o raio de influência da sonda para a distância fonte-detetor em questão. Para os dois casos analisados, $l_g=2$ e 6cm, o raio de influência variou respectivamente de 15 para 20 cm aproximadamente, o que caracteriza nitidamente a sua dependência em relação à distância fonte-detetor, pelo menos para pequenos valores desta.

A própria maneira como for realizada a experiência acima dá uma indicação de como se pode avaliar, aproximadamente, o raio de influência de uma sonda em um material qualquer, por exemplo o concreto. Para tanto basta que se faça uma série de corpos de prova cilíndricos de concreto, cujos diâmetros difiram de 10 em 10 cm até um diâmetro que se estime conter com folga o raio de influência da sonda nesse material. Os corpos de prova devem ter um tubo de aceso central para a introdução da sonda. Toma-se, então a taxa de contagem em cada corpo de prova, construindo-se uma curva "taxa de contagem versus espessura de concreto" ao redor do tubo de aceso, à semelhança da Fig.III.8. O raio de influência da sonda no concreto será a espessura desse material ao redor do tubo a partir da qual a taxa de contagem não aumentar mais de 5%.

3.3 - A Curva de Calibração da Sonda

Para uma distância fixa fonte-detetor, a curva de resposta correspondente pode ser definida como aquela curva que configura a

relação entre a taxa de contagem e a densidade, para uma certa gama de densidades. Possui a conformação típica mostrada na Fig. II.19. O ramo ascendente da curva corresponde às baixas densidades (densidade até 1, aproximadamente), enquanto que o ramo descendente se relaciona às densidades mais elevadas (o ramo onde está o concreto, de $\rho \sim 2,4$). Uma curva de resposta passa portanto por um máximo, com uma inclinação nitidamente negativa ($dr / d\rho < 0$) na faixa de densidades do concreto e vizinhanças, qual quer que seja a distância fonte-detetor.

A calibração da sonda consiste justamente na obtenção das curvas de resposta e, posteriormente, na escolha dentre as mesmas, segundo critérios adequados (item 6.5.1), daquela que deve ser a curva de calibração, isto é, a curva de resposta que corresponde ao melhor desempenho da sonda.

Uma curva de resposta é construída plotando-se valores de taxa de contagem contra a densidade do material ensaiado, obtidos por medidas tomadas em corpos de prova de diversos materiais, com densidades em uma faixa que inclua com margem suficiente as densidades dos materiais a serem ensaiados na prática.

O comportamento genérico das curvas de resposta (Fig.II.19) - e portanto da curva de calibração - pode ser explicado como se segue.

Com a sonda em um meio de densidade nula (o vácuo) a radiação gama não experimentaria nenhuma dispersão, não chegando portanto ao detetor dessa maneira. Apenas seria registrada uma pequena taxa de contagem residual r_0 (Fig.II.19), devida à radiação do próprio meio-ambiente e à radiação direta entre a fonte e o detetor, apesar da blindagem.

No outro extremo, à medida que a densidade do meio tendesse ao infinito a taxa de contagem tenderia ao valor residual acima referido, uma vez que toda a radiação que penetrasse o meio seria aí absorvida pela colisão dos fótons com os elétrons do material, sem retornar ao detetor (PREISS et alii, 1978) ⁴³ .

Para densidades intermediárias, esclarece PLATA (1972) ³⁷ , a resposta do detetor vem determinada pelas probabilidades relativas de ocorrência dos efeitos Compton e fotoelétrico. Verifica-se que a probabilidade de ocorrência para o efeito Compton, referida à unidade de volume, é proporcional à densidade eletrônica do meio (número de elétrons por centímetro cúbico). Esta por sua vez, para uma composição química constante, é proporcional ao peso específico do meio. Como consequência a probabilidade do efeito Compton aumenta na razão direta do peso específico ou densidade do meio. Em contrapartida a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico também depende, entre outros fatores, da densidade do meio, aumentando com esta tanto para os fótons primários como para os já dispersados. O que acontece então é que, para uma distância fixa fonte-detetor, a probabilidade de ocorrência do efeito Compton predomina até um certo valor da densidade, portanto com a taxa de contagem aumentando até aí (ρ_m , Fig.II.19). A partir desse valor da densidade passa a predominar a absorção fotoelétrica dos fótons, com o que a taxa de contagem começa a decrescer, ficando desse modo caracterizado um máximo na curva de calibração.

A taxa de contagem r , dita total, medida com a sonda posicionada em um material, é constituída de duas parcelas de origens distintas, ou seja: $r_B = r_B + r_P$. A primeira, r_B , é devida à radiação direta da fonte através da blindagem, à radiação do ambiente e a uns poucos fótons que chegam ao detetor após defletidos no tu

bo de acesso. Desse modo r_b é insensível às variações de densidade, qualquer que seja o material em ensaio, sendo constante em média. Já a outra parcela, r_p , depende da densidade do material, pois corresponde aos fótons que alcançam o detetor após dispersados pelos elétrons do meio que esteja além do tubo de acesso.

3.3.1 - Fatores influenciando as Curvas de Resposta

As curvas de resposta podem ser alteradas dentro de certos limites, jogando-se com alguns fatores relevantes. Características das curvas tais como a densidade para a qual ocorre o ponto de máximo (ρ_m , Fig.II.19), sua inclinação e a magnitude das taxas de contagem, podem ser influenciadas para se obter curvas de resposta mais adequadas e, portanto, uma curva de calibração mais conveniente aos propósitos que se pretende para a sonda. Tais características e as maneiras como se pode alterá-las são comentadas a seguir:

- 1- A densidade ρ_m (Fig.II.19), para a qual ocorre o ponto de máximo de uma curva de resposta, é tanto maior quanto mais elevada é a energia inicial E_0 dos fótons gama. ONO e MACHIDA(1965)³² se referem ao fato tanto através de previsões teóricas das curvas de resposta como de resultados práticos, como os das Fig's III.10 e III.11. Nestas, como também na Fig.III.9, as curvas traçadas se referem à previsão teórica, estando os dados experimentais assinalados conforme a convenção indicada. Observa-se uma concordância muito boa da teoria com a prática. As taxas de contagem líquidas r_p (item 3.3.1) utilizadas para as curvas foram obtidas, para cada comprimento de blindagem l_s indicado, em cinco diferentes materiais.

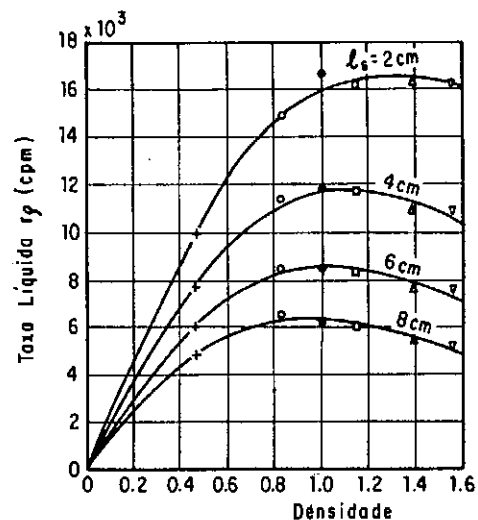


Fig. III.9 - Curvas de resposta p/ fonte de Cs^{137} (1 mCi) e comprimento do detector $\ell_d = 14$ cm.

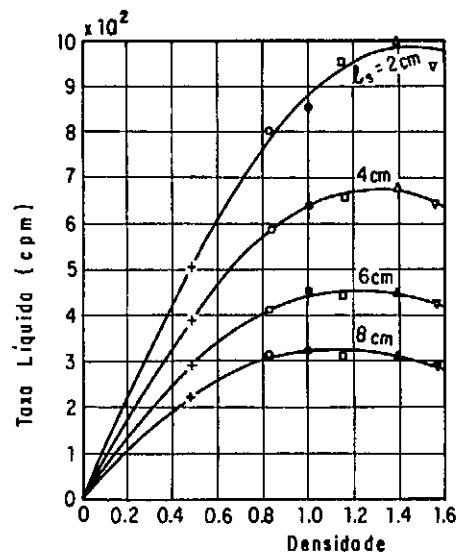


Fig. III.10 - Curvas de resposta p/ fonte de Cs^{137} (1 mCi) e comprimento do detector $\ell_d = 3,8$ cm.

CURVAS DE RESPOSTA
DA SONDA DE
ONO e MACHIDA (1965),
MUNIDA COM DETETOR G-M

- + - COQUE
- - ÓLEO LEVE
- - ÁGUA
- - ÁGUA SALGADA
- △ - ÓLEO ISOLANTE
- ▽ - ÓLEO ISOLANTE

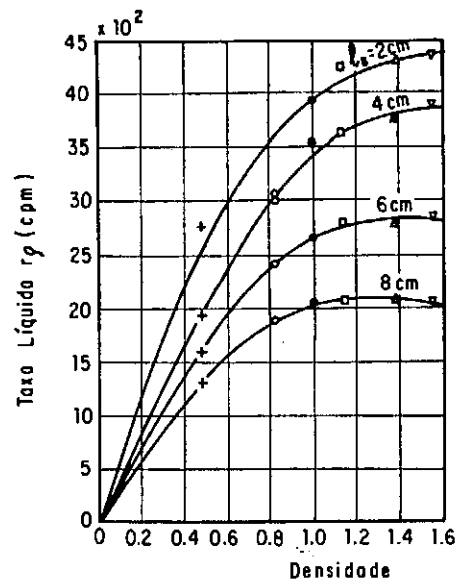


Fig. III.11 - Curvas de resposta p/ fonte de Co^{60} (200 uCi) e comprimento da detector $\ell_d = 3,8$ cm.

As condições de medida foram as mesmas, a menos do fato de que da Fig.III.10 para a III.11 trocou-se a fonte de césio 137 por outra de cobalto 60, este radionuclídeo apresentando uma energia inicial E_0 dos fótons praticamente o dobro da do césio. Conseqüentemente na comparação entre as Fig's III.10 e III.11, das curvas para l_s de 6 e 8 cm, constata-se que ρ_m aumentou em média 17% com a fonte de cobalto 60, o que não é muito, uma vez que se havia duplicado E_0 .

ONO e MACHIDA (1965)³² ainda apontam que ρ_m cresce com o decréscimo da distância fonte-detetor l e do comprimento do detetor l_d (Fig.III.7). A influência de l pode ser avaliada em cada uma das Fig's III.9, III.10 e III.11, uma vez que $l = l_s + \text{cte}$. Já a influência de l_d exige a comparação das Fig's III.9 e III.10: da primeira para a segunda diminuiu-se o comprimento do detetor em pouco mais de 3 vezes, com um aumento médio resultante em ρ_m de cerca de 16%. Pequeno, portanto, face à grande variação de l_d .

Aumentar ou diminuir ρ_m é importante, e a decisão a respeito depende da faixa de densidades em que se pretende utilizar a sonda. Para medir densidades pequenas - por exemplo, menores do que 1 -, é desejável elevar ρ_m , ao passo que para densidades maiores, como as da faixa desta pesquisa - de 1,00 a 2,40 -, é preferível que ρ_m apresente valor pequeno. É o que se pode depreender facilmente das Fig's III.9, III.10 e III.11, dado que se deve cuidar sempre de afastar a faixa de densidades a medir do intervalo de valores próximo ao pico da curva. Nesta região, pela pequena inclinação da curva, a flutuação inerente à taxa de contagem pode sugerir enganosamente grandes variações da densidade, mesmo que esta tenha se mantido constante ou pouco va

riado.

- 2- A inclinação das curvas de resposta aumenta com a energia inicial E_0 dos fótons, e muito, pelo menos para o ramo ascendente das curvas, como se conclui cotejando as Fig's III.10 e III.11. Da primeira para a segunda E_0 foi duplicada, aumentando grandemente a inclinação na porção ascendente das curvas.

Um aumento da atividade da fonte radioativa forçosamente eleva as taxas de contagem. Isto determina um acréscimo da inclinação da curva no seu ramo ascendente, já que a mesma deve passar pelo zero para densidade nula ($r_p = 0$ para $\rho = 0$). No entanto não se pode garantir que o mesmo ocorra no ramo descendente.

- 3- A magnitude das taxas de contagem de uma curva de resposta pode ser elevada com uma fonte radioativa de maior atividade. Ou então usando-se fontes constituídas de radionuclídeos com maior energia inicial E_0 dos fótons, conclusão a que se chega comparando as curvas da Fig.III.10 com as da Fig.III.11. O mesmo efeito também pode ser conseguido utilizando-se detetores com um comprimento maior (comparar Fig.'s III.9 e III.10), ou substituindo-se o detetor utilizado por outro mais eficiente.; por exemplo, em vez de um Geiger-Müller empregar um detetor de cintilação, este várias vezes mais eficiente. O aumento das taxas de contagem pode ainda ser conseguido diminuindo-se a distância fonte-detetor l (Fig.III.7), através do decréscimo do comprimento de blindagem l_s , como pode ser visto nas Fig's III.9, III.10 e III.11.

Os fatos que acabam de ser analisados interessam diretamente no projeto de uma sonda do tipo em questão, devendo ser bem compreendidos para que o aparelho resultante possua desempenho

tão bom quanto possível.

Desse modo, com base nos conceitos físicos acima explicados, é fundamental tentar entender o comportamento genérico das curvas de resposta e como ele é influenciado pelos parâmetros citados. Por exemplo, o fato de que quanto maior E_0 maior também se torna o ponto de máximo ρ_m dessas curvas (Fig.II. 19). Isso resulta de que fótons com maior energia inicial E_0 tem menor possibilidade de absorção fotoelétrica, pois subsistem a um maior número de colisões. Portanto, nas curvas de resposta a densidade ρ_m a partir da qual predomina o efeito fotoelétrico torna-se maior.

É interessante ainda se pensar a respeito de como l (Fig.III. 7) afeta ρ_m . À medida que a distância fonte-detetor l diminui, menor é a probabilidade de absorção fotoelétrica, já que é menor o caminho médio que os fótons devem percorrer até o detetor. Assim o efeito fotoelétrico só vai prevalecer sobre a interação Compton a maiores densidades, o que explica o aumento que se verifica em ρ_m .

3.3.2 - Equações para as Curvas de Resposta

Após a obtenção das taxas de contagem para as várias curvas é conveniente a pesquisa de funções que interpolem os pontos obtidos e representem adequadamente a tendência dos mesmos. Essas funções são muito úteis na medida em que, descrevendo analiticamente as curvas, permitem um tratamento matemático dos dados obtidos, o que evidentemente propicia interpretações e conclusões mais corretas.

O tratamento dado às taxas de contagem obtidas pa-

ra a construção de uma curva de resposta pode se constituir em um de dois enfoques possíveis: o empírico e o semi-empírico.

O enfoque empírico consiste na pesquisa de funções que bem se ajustem aos pontos obtidos e que tenham seus parâmetros determinados por meios puramente matemáticos como, por exemplo, o método dos mínimos quadrados. O nome empírico vem de que os parâmetros das curvas vão depender apenas dos dados experimentais, a saber as densidades e respectivas taxas de contagem. Portanto, as equações assim obtidas são ditas empíricas, como consequência de seus parâmetros serem todos eles empíricos. Nesta pesquisa, como carecesse de sentido uma maior sofisticação para preencher seus objetivos, foi adotado o enfoque empírico no ajuste de funções para as curvas de resposta (item 5.9).

No enfoque semi-empírico as funções utilizadas para o ajuste possuem não só parâmetros empíricos, que podem ser determinados pelo método dos mínimos quadrados, como também parâmetros físicos dos materiais, calculados com base em características dos elementos químicos que os compõem e suas proporções. Daí tais equações para as curvas de resposta serem chamadas de semi-empíricas. Este enfoque, como se pode perceber, é bem mais sofisticado. Suas potencialidades tem sido exploradas com excelentes resultados e conclusões utilíssimas por parte de alguns autores, como se pode concluir de BALLARD e GARDNER (1965)³, GARDNER e ROBERTS (1967)¹⁶ e GARDNER et alii (1971)¹⁴.

Nas equações que se seguem chamou-se de ρ à densidade e de r_p à taxa de contagem líquida correspondente.

a) Equações Empíricas.

A mais simples é a equação da reta:

$$r_p = A \cdot p + B \quad (\text{III.8})$$

com A e B sendo os parâmetros empíricos a determinar no ajuste (item 5.9).

TOBIO (1967)⁵⁵ sugeriu o ajuste por uma função do tipo:

$$r_p = A \cdot p \cdot e^{-B \cdot p} \quad (\text{III.9})$$

que se descobre ser um caso particular da equação de Irick, para $n=1$, esta sendo dada por (BALLARD e GARDNER, 1965)³:

$$r_p = A \cdot p^n \cdot e^{-B \cdot p} \quad (\text{III.10})$$

A, B e n são os parâmetros a serem determinados pelo método dos mínimos quadrados (item 5.9).

As três equações acima foram utilizadas nesta pesquisa, fornecendo excelentes ajustes para as curvas de resposta (item 6.5).

b) Equações semi-empíricas.

Uma equação desse tipo, devida a Czúbek e Zuber, é apresentada pela IAEA (1971)²⁰ :

$$r_p = (p \cdot \beta)^a \cdot 10^{[b + c \cdot p \cdot \beta + d \cdot Z_{eq}^{3,5}]} \quad (\text{III.11})$$

onde a, b, c, e d são os parâmetros ou constantes a determinar pelo procedimento de calibração. Sem explicações mais reveladas, ras relata ainda a mesma fonte que as constantes a e c dependem da distância fonte-detetor, b depende da construção da sonda e d se relaciona à eficiência espectral de detecção. Já β e Z_{eq} são parâmetros físicos, definidos como se segue:

$$\beta = \sum_i^n p_i \frac{Z_i}{A_i} \quad Z_{eq} = \sqrt[4,5]{\frac{\sum_i^n p_i \frac{Z_i}{A_i}}{\sum_i^n p_i \frac{Z_i}{A_i}}} \quad (\text{III.12})$$

Tem-se que p_i é a fração em peso do elemento químico de número de massa A_i é número atômico Z_i , um dos n elementos que compõem o material único (um dado solo) empregado em várias densidades para obtenção dos pontos essenciais à curva de resposta. A expressão de Z_{eq} acima é válida, apenas, quando estão ausentes os elementos químicos pesados, como o urânio, o chumbo e outros. Z_{eq} é o chamado número atômico equivalente.

BALLARD e GARDNER (1965)³ chegaram a uma equação semi-empírica que, com pequenas mudanças sugeridas por GARDNER e ROBERTS (1967)¹⁶, se tornou em:

$$r_p = C \cdot 10^{(a+bC+cP)} \quad (\text{III.13})$$

Os parâmetros a , b e c são empíricos, uma vez que sua determinação é feita pelos dados experimentais, através do método dos mínimos quadrados. C e P são respectivamente as probabilidades de ocorrência do efeito Compton e do efeito fotoelétrico:

$$C = \rho \cdot \sum_i^n p_i \cdot \frac{Z_i}{A_i} \quad P = \rho \cdot \sum_i^n p_i \frac{Z_i^5}{A_i} \quad (\text{III.14})$$

A equação III.13, além de simples e atender às condições de fronteira ($r_p \rightarrow 0$ para $\rho \rightarrow 0$ e $\rho \rightarrow \infty$), aponta McDOUGALL (1971)²⁸, separa convenientemente a dependência da resposta do aparelho em relação aos efeitos Compton e fotoelétrico. Segundo os autores citados excelentes resultados tem sido obtidos em ajustes com a referida equação.

ONO e MACHIDA (1965)³², considerando uma sonda com

uma fonte radioativa pontual separada de um detetor linear por uma blindagem também linear, apresentam uma equação teórica para previsão das curvas de resposta, a qual mostrou excelente concordância com os dados obtidos pelos autores, como foi visto no item anterior ao se comentar as Fig's III.9, III.10 e III.11. A função, por sinal um tanto complexa, não tem a sua origem esclarecida pelos autores. O que, sem dúvida, teria sido interessante, pela curiosidade em se saber como foi considerado, em bases físicas e probabilísticas, o fenômeno da interação da radiação com a matéria e sua detecção pela sonda. Além da dependência em relação à densidade, que é a principal, tal função descreve a resposta da sonda ainda como dependente tanto de parâmetros físicos dos materiais a ensaiar como de parâmetros geométricos da própria sonda, a saber a distância fonte-detetor l e comprimento do detetor l_d (Fig.III.7). O presente trabalho se furta a analisar essa equação mais detidamente, o que considera tarefa além dos seus objetivos.

3.4 - A Estatística da Radioatividade

Ao se realizar um conjunto de contagens, isto é, ao se contar por algumas vezes sucessivas o número n de emissões radioativas detetadas em iguais intervalos de tempo t , em condições constantes, logo se percebe que o valor de n é essencialmente aleatório - o que não quer dizer que seja arbitrário. Sendo assim costuma-se realizar não uma contagem, mas sim um conjunto de contagens n , obtidas nas mesmas condições, e adotar como valor representativo das mesmas a sua média aritmética, ou seja, a contagem média \bar{n} . Feito isto, o valor \bar{n} da contagem média, por simplicidade, passa a ser chamado apenas de contagem, ou seja, diz-se que

\bar{n} é a contagem para uma determinada situação de ensaio. Por extensão, neste trabalho, passou-se ainda a designar por contagem também à variável aleatória n , do número de emissões radioativas que podem ocorrer num dado tempo t , em várias medidas sucessivas. As diferenças de sentido poderão ser entendidas do próprio contexto.

Pode ser provado (BEERS, 1962) ⁴ que os valores n de uma determinada contagem ocorrem em torno de sua média μ_n obedecendo teoricamente à distribuição de Poisson, a qual na prática, descreve de modo acurado o decaimento radioativo. Na realidade, se as contagens n são grandes o suficiente, próximas ou acima de 100 (TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES, 1977) ⁵⁷, a distribuição de Poisson se aproxima o bastante da distribuição de Gauss para que possa ser considerada um caso particular desta, em que o desvio padrão é igual à raiz quadrada da média.

Todos os valores de contagem obtidos nesta pesquisa se encontram no caso acima, sendo maiores do que 100, a grande maioria sendo muitas vezes maior. Em tais condições, portanto, a distribuição normal ou de Gauss pode ser empregada para se decidir a respeito da validade das contagens obtidas.

Embora na prática das medidas nucleares os conceitos teóricos acima já tenham sido exaustivamente comprovados, é necessário sempre verificar se novos conjuntos de medidas também assim se comportam, para que possam ser aceitos como representativos. A verificação da validade de um conjunto de contagens é feita em cima de juízos probabilísticos que, por sua vez, são calcados na distribuição normal de probabilidades. Sabe-se que esta, nas condições referidas acima, descreve satisfatoriamente a ocorrência das contagens de um ensaio em torno de sua média, isto é, descreve de modo acurado a população ou universo de contagens possíveis para

aquela situação. Evidentemente a média e o desvio padrão desse u niverso são desconhecidos, e só podem ser estimados através dos mesmos parâmetros da amostra, vale dizer, do conjunto de contagens. No entanto isso só é feito sem erros grosseiros quando o conjunto possui um número mínimo de contagens, caso contrário os intervalos de confiança determinados para as contagens podem diferir substancialmente dos verdadeiros, o que afeta diretamente a decisão sobre a validade das medidas obtidas. É o que passa a ser analisado em seguida.

Sendo a distribuição normal simétrica em relação à sua média, para um conjunto de contagens n pode-se escrever o seguinte intervalo de confiança teórico, sendo μ_n e σ_n respectivamente a média e o desvio padrão do universo de valores de n :

$$\mu_n - u(P\%). \sigma_n \leq n \leq \mu_n + u(P\%). \sigma_n \quad (\text{III.15})$$

Nesse intervalo $u(P\%)$ quantifica o afastamento em relação à média dos extremos do intervalo, de tal modo que no mesmo ocorram valores da contagem n com $P\%$ de confiança ou probabilidade. Alguns valores $u(P\%)$ e as correspondentes probabilidades $P\%$ são dados na Tab. III.1, a seguir:

VALORES DE $u(P\%)$	0,6745	1,00	1,28	1,645	1,96	3,00
PROBABILIDADE DO INTERVALO DE DO INTER- VALO P%	50%	68,27%	80%	90%	95%	99,73%

Tab.III.1 - Valores de $u(P\%)$ que fornecem os intervalos centrados na média - expressão III.15 - e as correspondentes probabilidades $P\%$ de ocorrência (Fonte: SPIEGEL, 1974)⁴⁹.

Se do universo dos valores de contagem n possíveis em um ensaio se obtiver vários conjuntos de contagens, com N elementos cada, calculando para cada um deles a média \bar{n} e o desvio padrão S_n respectivos descobre-se que ambos os parâmetros também possuem um correspondente universo de valores. São as chamadas distribuições por amostragem da média e do desvio padrão, teóricas.

Para a distribuição da média amostral, a média $\mu_{\bar{n}}$ e o desvio padrão $\sigma_{\bar{n}}$ são dados por

$$\mu_{\bar{n}} = \mu_n \quad \sigma_{\bar{n}} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{N}} \quad (\text{III.16})$$

onde N é o número de medidas de cada conjunto de contagens.

Mesmo que o universo original dos valores de n - de onde foram extraídos os conjuntos de contagens - não seja normal, pode-se considerar a distribuição por amostragem das médias \bar{n} como sendo normal, bastando para isso que cada conjunto possua pelo menos de 4 a 5 contagens (FUSCO, 1977)¹³.

Portanto, por analogia aos raciocínios acima desenvolvidos para uma contagem n qualquer, a média \bar{n} de um conjunto ocasional de N contagens estará, com $P\%$ de probabilidade, contida no intervalo:

$$\mu_n - u(P\%) \cdot \frac{\sigma_n}{\sqrt{N}} \leq \bar{n} \leq \mu_n + u(P\%) \cdot \frac{\sigma_n}{\sqrt{N}} \quad (\text{III.17})$$

A expressão III.17 pode ser reescrita da forma

$$|\bar{n} - \mu_n| \leq u(P\%) \cdot \frac{\sigma_n}{\sqrt{N}} \quad (\text{III.18})$$

o que sugere uma expressão para o erro relativo da média amostral

\bar{n} em relação à média do universo de valores de n , μ_n . Basta dividir ambos os membros da expressão III.18 por μ_n obtendo-se

$$Er = \frac{|\bar{n} - \mu_n|}{\mu_n} \leq \frac{u(P\%) \cdot \sigma_n}{\sqrt{N} \cdot \mu_n} \quad (III.19)$$

A inequação acima, conforme se pode deduzir da expressão III.17, significa que, com P% de confiança, o erro relativo na média amostral é menor ou igual ao valor dado pelo 2º membro. Conforme a tabela III.1, para um nível de confiança de 95%, $u(95\%)$ é igual a 1,96. A expressão III.19 se torna então:

$$Er = \frac{|\bar{n} - \mu_n|}{\mu_n} \leq \frac{1,96}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sigma_n}{\mu_n} \quad (III.20)$$

A fração σ_n/μ_n na expressão é o que os estatísticos chamam de coeficiente de variação da variável n . Trata-se de um valor teórico, já que é o quociente do desvio padrão σ_n pela média μ_n , ambos parâmetros do universo de valores de n . De acordo com a distribuição de Poisson (2º parágrafo), para uma contagem com média μ_n ocorre que $\sigma_n = \sqrt{\mu_n}$. Portanto, da desigualdade III.20 infere-se que:

$$Er = \frac{|\bar{n} - \mu_n|}{\mu_n} \leq \frac{1,96}{\sqrt{N}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_n}} \quad (III.21)$$

Ou seja, com 95% de probabilidade, o erro relativo da estimativa da média universal pela média amostral \bar{n} , de uma amostra qualquer de N contagens, é menor ou igual ao segundo membro da expressão III.21 acima. Nesta está estabelecido que o erro cometido ao se estimar a contagem média universal μ_n pela contagem média amostral \bar{n} diminui com o número N de medidas do conjunto de contagens, sendo inversamente proporcional à raiz quadrada deste número.

Na tabela III.2 constam valores do erro relativo correspondentes a contagens médias μ_n , teóricas, e a conjuntos de contagens com 6 medidas ($N=6$), conforme as desta pesquisa. Como a menor contagem medida neste trabalho foi pouco acima de 180, este valor foi assumido para a menor média μ_n da tabela. Os demais valores de μ_n foram escolhidos de modo a cobrir a faixa de todas as contagens obtidas nos ensaios, com o erro relativo cometido quando se torna $\mu_n = \bar{n}$ podendo então ser estimado.

MÉDIA DO UNIVERSO μ_n	$Er \leq$	INTERVALO DE \bar{n} EM TORNO DE μ_n , COM 95% DE PROB. (EXPRESSÃO III.17)
180	6,0%	169 - 191
250	5,1%	237 - 263
500	3,6%	482 - 518
1.000	2,5%	975 - 1025
2.000	1,8%	1964 - 2036
5.000	1,1%	4945 - 5055
10.000	0,80%	9920 - 10080
15.000	0,65%	14902 - 15098
20.000	0,57%	19886 - 20114

Tab. III.2 - O erro relativo Er ao se tomar $\mu_n = \bar{n}$, para conjuntos de 6 contagens, e o correspondente intervalo de variação da média amostral \bar{n} , com 95% de probabilidade.

Os resultados da tabela III.2 mostram que, com 95% de probabilidade, o erro relativo na média μ_n , ao considerá-la igual a \bar{n} , é menor ou igual a 6,0% para a menor contagem, diminuindo ainda mais para as maiores. O erro, portanto, é pequeno mesmo para um conjunto de 6 contagens como os deste trabalho, sendo que diminui

tanto com o aumento do número N de medidas do conjunto como com o crescimento de μ_n , vale dizer, da contagem (expressão III.21).

Sendo assim fica justificado o costume generalizado na prática de se considerar, no que diz respeito à detecção de radiação, $\mu_n = \bar{n}$ para o cálculo do desvio padrão do universo, que passa a ser $\sigma_n = \sqrt{\bar{n}}$ (em vez de $\sqrt{\mu_n}$). MAFRA (1973)²⁶, BEERS (1962)⁴ e HOLMAN (1977)¹⁹, entre outros, assim o sugerem e, de fato, não há outra alternativa para essa estimativa. Os mesmos autores, quando se dispõe de um único valor de contagem n , recomendam que o desvio padrão seja avaliado pela raiz do próprio valor, $\sigma_n = \sqrt{n}$. Na verdade agir assim significa considerar n o suficientemente próximo de \bar{n} para ser considerado como tal, o que não foge muito à realidade, haja visto a dispersão dos próprios valores de contagem obtidos neste trabalho (cap.VI). Este não é um procedimento incomum, sendo muito empregado em uma avaliação preliminar do tempo de contagem necessário para que um determinado erro nas contagens não seja ultrapassado. Portanto, para contagens únicas e elevadas, o erro é razoavelmente pequeno ao se considerar $n = \bar{n}$ ($= \mu_n$) e calcular $\sigma_n = \sqrt{n}$, podendo ser suficiente quando a exigência quanto à acurácia não é muito rigorosa. No caso desta pesquisa, no entanto, o procedimento de uma contagem única seria inadequado, pois impediria uma avaliação da dispersão das contagens e, portanto, da estabilidade dos aparelhos durante as mesmas.

Concluindo, é lícito se estimar a média μ_n do universo de valores de uma contagem pela média amostral \bar{n} , já que o erro é pequeno quando a amostra possui mais de 5 ou 6 contagens. No entanto, sabe-se a distribuição por amostragem do desvio padrão S_n não é normal para as pequenas amostras, as de menos de 30 elementos,

aproximadamente ($N < 30$).

Segundo FUSCO (1977)¹³ as grandes amostras são aquelas para as quais o erro relativo na estimativa de σ_n pelo desvio padrão amostral S_n é menor ou igual a 25%, com 95% de probabilidade, o que ocorre para conjuntos com mais de 32 contagens. Ou seja:

$$Er = \frac{|S_n - \sigma_n|}{\sigma_n} \leq \frac{1,96}{\sqrt{2(N-1)}} \leq 0,25 \text{ para } N \geq 32 \quad (\text{III.22})$$

Esta expressão foi deduzida analogamente à expressão III.21, considerando-se a distribuição por amostragem do desvio padrão S_n como sendo normal (o que só é válido para $N > 30$ aproximadamente) e que

$$\mu_{S_n} = \sigma_n \quad \sigma_{S_n} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{2(N-1)}} \quad (\text{III.23})$$

Portanto, para as grandes amostras - conjuntos de medidas com mais de 30 contagens -, geralmente se aceita estimar o desvio padrão σ_n como sendo o desvio padrão amostral S_n , o que mesmo assim não ocorre sem o erro acima apontado. Para as pequenas amostras o erro na estimativa de σ_n por S_n é ainda maior, sendo S_n considerado então inadequado para se reescrever a expressão III.15 como

$$\bar{n} - u(P\%).S_n \leq n \leq \bar{n} + u(P\%).S_n \quad (\text{III.24})$$

o que tornaria tal intervalo suficientemente inexato para impedir qualquer juízo propabilístico confiável. Além disso para as pequenas amostras a expressão III.22 não é válida, uma vez que para as mesmas a distribuição amostral do desvio padrão não pode ser considerada normal.

Por outro lado, mesmo para as grandes amostras, em vez

de se julgar a validade de cada uma das contagens de um conjunto delas, através da expressão III.24, é muito mais adequado se estudar a validade do próprio conjunto de contagens como um todo. Isso poderia ser realizado estudando-se a probabilidade de ocorrência da média amostral \bar{n} . No entanto a partir da hipótese de que se pode substituir a média μ_n do universo pela média amostral \bar{n} , o que na realidade é feito (e de fato não há outra alternativa), a verificação da validade do conjunto de contagens em questão recai obrigatoriamente na análise da probabilidade de ocorrência da variância ou do desvio padrão amostral. Para as pequenas amostras, como no caso da presente pesquisa (conjuntos de 6 contagens), o procedimento adequado é o estudo da probabilidade de ocorrência da variância do conjunto de contagens obtido, o que é feito através do teste de χ^2 , analisado no item 5.8.

A extensão às taxas de contagem r dos conceitos expostos neste item é quase imediata, bastando para isso observar que $r = n/t$ e $\sigma_r = \sqrt{\bar{n}}/t = \sqrt{\bar{r}/t}$, esta última expressão justificada no item seguinte.

3.5 - Flutuação Estatística da Taxa de Contagem

3.5.1 - Introdução

Evidentemente, o que de fato interessa nos ensaios não são as respectivas contagens n , mas as suas taxas de contagem r , dadas, geralmente, em contagens por minuto (cpm). Estas, sim, são significativas, uma vez que exprimem as contagens obtidas na unidade de tempo para as várias situações de ensaio, o que permite uma comparação das medidas nas mesmas bases. Tem-se, então:

$$r = n/t \quad (III.25)$$

Nesta pesquisa os valores das contagens e das respectivas taxas de contagem foram tomadas sempre como a média aritmética de 6 medidas feitas sucessivamente, nas mesmas condições. Tais valores médios, os mais prováveis, foram considerados como representativos dos valores obtidos e utilizados nos gráficos.

Esse procedimento se justifica desde que a contagem sempre apresenta uma flutuação estatística intrínseca (item 3.1.3), característica de qualquer emissão radioativa. Trabalhou-se então com valores médios de contagem para poder avaliar se o seu desvio padrão real (uma medida da flutuação) está próximo do teórico, dentro de limites que se considera satisfatórios na prática e compatíveis com o bom funcionamento do sistema de medição. Essa avaliação foi feita através do teste do qui-quadrado (χ^2), item 5.8.

Nas sondas nucleares, ao se ensaiar um material obtém-se uma taxa de contagem r , dita total, composta da soma de duas parcelas de origens distintas, r_b e r_p .

Assim, tem-se que

$$r = r_b + r_p, \quad (III.26)$$

onde:

r_b = taxa de contagem de fundo, correspondente à contagem n_b obtida no tempo de observação t_b . É medida em separado de r . Também é chamada de "background".

r_p = taxa de contagem líquida, correspondente à contagem n_p obtida no tempo t . Responde pela densidade do material ensaiado e está embutida em r , não podendo ser medida em separado.

A equação III.26 pode então ser reescrita da forma:

$$r = \frac{n_b}{t_b} + \frac{n_p}{t} = \frac{n_b(t/t_b)}{t} + \frac{n_p}{t} = \frac{n_b(t/t_b) + n_p}{t} \quad (\text{III.27})$$

Às vezes, como se explica no item 3.5.3, adota-se t_b maior do que t . Desse modo, pela equação III.27 pode-se observar que embora a contagem de fundo no tempo t_b seja n_b , a mesma contagem no tempo t , em que se mede a contagem total n , vale $n_b(t/t_b)$.

Portanto:

$$n = n_b(t/t_b) + n_p \quad (\text{III.28})$$

Voltando à equação III.26, a parcela da taxa de contagem total que realmente interessa é r_p , correspondente à contagem n_p e que é o valor sensível à densidade do material ensaiado. No entanto r_p não pode ser medida diretamente. Em verdade se mede a taxa de contagem total r e a taxa de contagem de fundo r_b . A taxa de contagem líquida r_p pode então ser obtida por simples subtração:

$$r_p = r - r_b \quad (\text{III.29})$$

A parcela $n_b(t/t_b)$ da contagem n é devida à radiação do meio ambiente somada à radiação direta entre a fonte e o detector, através da blindagem e apesar desta. Fornece o chamado "background" ou taxa de contagem de fundo do aparelho, r_b , que só deve ser medida na ausência de qualquer material nas proximidades da sonda (item 6.4.1). Possui o "background" r_b um valor constante em média, característico do aparelho, não sendo evidentemente afetado pela densidade do material ensaiado.

Resta observar que o termo "background" é usado na literatura técnica e neste trabalho para designar tanto a conta-

gem n_b como a sua taxa r_b , podendo-se perceber a diferença no próprio contexto do que é exposto.

3.5.2 - O Desvio Padrão da Taxa de Contagem Medida com Exatidão no Tempo de Observação

Como ao se medir N valores de uma contagem qualquer n os mesmos ocorrem em torno de sua média $\mu_n (\approx \bar{n})$ segundo a distribuição de Poisson, tem-se então, para o desvio padrão teórico σ_n da contagem, o valor:

$$\sigma_n = \sqrt{\bar{n}} \quad (\text{III.30})$$

Lembrar que a estimativa do desvio padrão real das N contagens obtidas é feita pela expressão usual em Estatística:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}{N - 1}} \quad (\text{III.31})$$

Geralmente, o que interessa é o desvio padrão teórico σ_r da taxa de contagem r . Nas scalars atualmente empregados o tempo de observação t é medido com acurácia e precisão muito grandes (item 5.3), podendo ser considerado como praticamente exato. Sendo assim deduz-se das equações III.25 e III.30 que o desvio padrão teórico da taxa de contagem total r é dado por:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\bar{n}}}{t} = \sqrt{\frac{\bar{r}}{t}} \quad (\text{III.32})$$

Notar que o desvio-padrão real S_r da taxa total r é calculado pela expressão clássica:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum (r_i - \bar{r})^2}{N - 1}} \quad (\text{III.33})$$

Evidentemente, para a taxa de contagem de fundo r_b o cálculo dos desvios padrões teóricos (σ_{rb}) e real (S_{rb}) é feito

de maneira inteiramente análoga às duas equações acima.

Já o cálculo do desvio padrão teórico da taxa de contagem líquida r_p merece maiores considerações.

Segundo a equação III.29 $r_p = r - r_b$, sendo portanto um valor função das taxas de contagem total e de fundo. O desvio padrão teórico de r_p pode então ser calculado pela Teoria dos Erros (BEERS, 1962)⁴, considerando-se os erros ou desvios em r e r_b como independentes - o que é perfeitamente razoável -, e os tempos t e t_b como exatos. Tomando-se então os desvios padrões teóricos de r e r_b tem-se o desvio teórico de r dado por:

$$\sigma_{r_p} = \sqrt{\left[\frac{\partial r_p}{\partial r}\right]^2 (\sigma_r)^2 + \left[\frac{\partial r_p}{\partial r_b}\right]^2 (\sigma_{r_b})^2} \quad (\text{III.34})$$

Tem-se que:

$$\frac{\partial r_p}{\partial r} = 1 \quad \text{da equação III.29}$$

$$\frac{\partial r_p}{\partial r_b} = -1$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\bar{r}}{t}}$$

$$\sigma_{r_b} = \sqrt{\frac{\bar{r}_b}{t_b}} \quad \text{da equação III.32}$$

A equação III.34 pode então ser reescrita da forma:

$$\sigma_{r_p} = \sqrt{\frac{\bar{r}}{t} + \frac{\bar{r}_b}{t_b}} \quad (\text{III.35})$$

A expressão acima, portanto, fornece o desvio padrão teórico da taxa de contagem líquida r_p . Notar que os tem

pos de observação ou contagem, t e t_b , foram considerados exatos.

Quando $t = t_b$ tem-se:

$$\sigma_{rp} = \sqrt{\frac{\bar{r} + \bar{r}_b}{t}} \quad (\text{III.36})$$

Por outro lado ao se utilizar na Teoria os Erros (BEERS, 1962)⁴ os desvios padrões reais de r e r_b , calculados com as contagens de um conjunto de N medidas, obtem-se o correspondente desvio padrão real da taxa de contagem líquida r :

$$S_{rp} = \sqrt{(S_r)^2 + (S_{rb})^2} \quad (\text{III.37})$$

Para um conjunto de N valores da taxa de contagem r , define-se o erro relativo E_r , teórico ou real, como sendo o quociente do seu desvio padrão, respectivamente teórico ou real, pela taxa de contagem média \bar{r} .

Para as taxas de contagens que são medidas diretamente, r e r_b , a expressão do erro relativo teórico é a que se segue, bastando empregar-se para o cálculo o valor médio correspondente da contagem, \bar{n} ou \bar{n}_b :

$$Er(r) = \frac{\sigma_r}{\bar{r}} = \frac{\sqrt{\bar{n}}/t}{\bar{n}/t} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}} \quad (\text{III.38})$$

Em percentagem, o erro relativo teórico será:

$$Er(r)\% = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}} \times 100 \quad (\text{III.39})$$

Do mesmo modo, pode ser deduzido o erro relativo teórico para uma contagem medida diretamente, n ou n_b , chegando-se às mesmas expressões III:38 e III.39.

Já para a taxa de contagem líquida r_p , obtida pela diferença $r - r_b$ (equação III.29), embora, é claro, valha a definição de erro relativo não é válida a expressão III.38, mas a

seguinte, derivada da expressão III.35:

$$Er(r_p) = \frac{\sigma_{r_p}}{\bar{r}_p} = \frac{\sqrt{\frac{\bar{r}}{t} + \frac{\bar{r}_b}{t_b}}}{\bar{r}_p} \quad (\text{III.40})$$

Nesta pesquisa, o desvio padrão e o erro relativo da taxa de contagem acima definidos não devem ser entendidos como uma estimativa da precisão de um grupo de taxas de contagem. É que o termo precisão se aplica no sentido de quantificar a maior ou menor dispersão de um conjunto de medidas de uma grandeza determinística, como a massa de um corpo ou o seu comprimento. Já a taxa de contagem é uma grandeza intrinsecamente aleatória, com o que as medidas de uma mesma taxa não devem ser avaliadas como mais ou menos precisas, e sim como mais ou menos dispersas.

3.5.3 - A Influência do Tempo de Medida no Desvio Padrão da Taxa de Contagem

A equação III.39 mostra claramente que o erro relativo teórico de uma taxa de contagem obtida diretamente, r ou r_b , depende da contagem correspondente, sendo grande para valores pequenos da contagem mas diminuindo com o aumento desta, como pode ser visto na tabela III.3.

O artifício utilizado para se elevar a contagem obtida com a sonda, seja medindo o "background" ou ensaiando um material, é aumentar o tempo de observação. Com isso se consegue diminuir o erro relativo teórico, como se pode perceber claramente através da equação III.39. Como nas sondas nucleares a taxa de contagem de fundo é pequena em relação à total, às vezes adota-se um tempo de contagem t_b maior do que o tempo de obser-

Tob. III. 3 - Erro relativo teórico do taxa de contogem, devido `a sua flutuação estatística.

$$Er = \frac{\sigma_r}{\bar{r}}$$

TAXA DE CONTAGEM \bar{r} (cpm)	ERRO RELATIVO Er
10	31,6 %
50	14,1 %
100	10,0 %
180	7,5 %
250	6,3 %
500	4,5 %
1.000	3,2 %
2.000	2,2 %
5.000	1,4 %
10.000	1,0 %
100.000	0,3 %
1.000.000	0,1 %

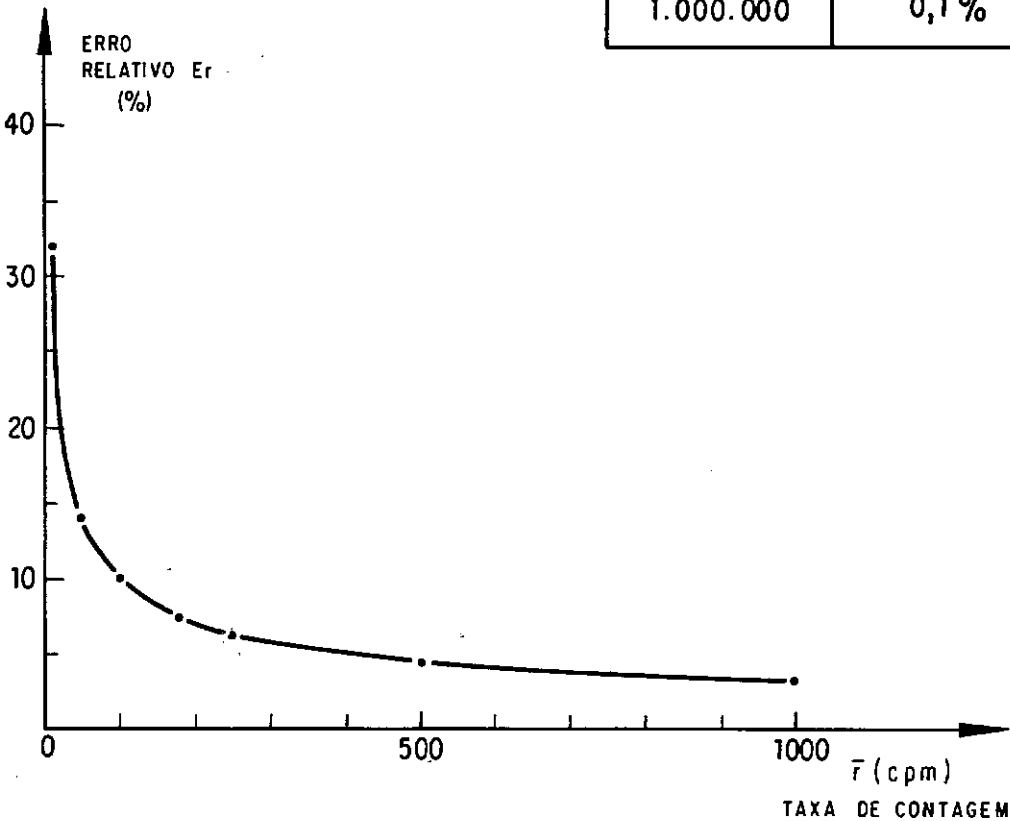


Fig. III.12 - Erro relativo teórico na taxa de contagem, segundo a tab. III.3.

vação total t . Ao se elevar t_b está-se diminuindo r_b (equação III.32) e, portanto, diminuindo a dispersão em r_b e também em r_p (equação III.35). Esta previsão teórica é, de fato, comprovada na prática. No entanto, o decréscimo no erro relativo teórico ao se incrementar o tempo de observação é muito pequeno para contagens acima de 500, como se observa na Fig.III.12 e tabela correspondente.

3.5.4 - O Desvio Padrão da Taxa de Contagem Medida sem Exatidão no Tempo de Observação

Se a marcação do tempo de contagem não possui suficiente acurácia o erro cometido pode influir significativamente no desvio padrão da taxa de contagem, e essa influência deve então, necessariamente, ser estimada e pesada. Isso ocorre, por exemplo, quando a marcação de tempo é feita manualmente, como o foi em grande parte deste trabalho. Tal procedimento se impôs na presente pesquisa quando os dispositivos automáticos de controle do tempo, do próprio scaler utilizado, se danificaram (apêndice B.1).

Suponha-se primeiramente que, havendo erro nos tempos de contagem t e t_b , possa ser a cada um deles associados o desvio padrão S_t , isto é, tome-se $S_t = S_{tb}$, conforme é visto no item seguinte. Pela Teoria dos Erros (BEERS, 1962)⁴ o desvio padrão teórico da taxa de contagem líquida r_p é dado, então, por:

$$\sigma_{r_p} = \sqrt{\left[\frac{\partial r_p}{\partial r}\right]^2 (\sigma_r)^2 + \left[\frac{\partial r_p}{\partial r_b}\right]^2 (\sigma_{r_b})^2 + \left[\frac{\partial r_p}{\partial t}\right]^2 (S_t)^2 + \left[\frac{\partial r_p}{\partial t_b}\right]^2 (S_{tb})^2}$$

(III.41)

Os dois primeiros termos no radicando já foram deduzidos para a equação III.35. Segue-se a dedução dos demais.

A equação III.29 pode ser reescrita como:

$$r = \frac{n}{t} - \frac{nb}{tb} \quad (\text{III.42})$$

Portanto:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = - \frac{n}{t^2} = - \frac{r}{t} \quad \frac{\partial r}{\partial b} = \frac{nb}{tb^2} = \frac{rb}{tb}$$

Estes resultados substituídos na equação III.41 fornecem o desvio padrão teórico da taxa de contagem líquida r , medida com erro no tempo de observação:

$$\sigma_{rp} = \sqrt{\frac{r}{t} + \frac{rb}{tb} + \left[\frac{r^2}{t^2} + \frac{rb^2}{tb^2} \right] (S_t)^2} \quad (\text{III.43})$$

Se $t = t_b$ obtém-se:

$$\sigma_{rp} = \sqrt{\frac{r + rb}{t} + \frac{(r^2 + rb^2)}{t^2} (S_t)^2} \quad (\text{III.44})$$

Por um procedimento análogo ao que acaba de ser seguido, obtém-se para os devidos padrões teóricos das taxas de contagem total e de fundo medidas sem exatidão no tempo, a expressão:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{r}{t} + \left[\frac{r}{t} \right]^2 (S_t)^2} \quad (\text{III.45})$$

3.5.5 - Uma Estimativa para o Desvio Padrão do Tempo de Contagem

Na maior parte deste trabalho os ensaios foram realizados com marcação manual do tempo de contagem (ap.B.1), no que se empregou um cronômetro eletrônico com discriminação de 1/10s (1 décimo de segundo).

A marcação manual do tempo consiste em se disparar com uma das mãos o cronômetro enquanto a outra mão simultaneamente dispara a contagem e, posteriormente, ao final do intervalo de tempo predeterminado, se travar do mesmo modo o cronômetro e a contagem. Evidentemente não se consegue efetuar tais operações com ambas as mãos em rigorosa simultaneidade e, ainda, marcar com exatidão o tempo em relação ao prefixado. Incorre-se então em um erro no tempo de contagem. Este erro tem origem em dois instantes distintos: no início e no final da cronometragem.

O erro no tempo cometido de início, entre se disparar o cronômetro e a contagem, não pôde ser medido. No entanto foi possível estimá-lo através do erro cometido ao se travar o cronômetro no final, pela diferença entre o tempo lido e o previamente determinado para se efetuar as medidas. Esta diferença, embora não tenha sido anotada, teve seus valores atentamente observados em todas as medidas manuais e poucas vezes atingiu os 3/10s. Com isso se pode tomar um valor de 2/10s para o desvio médio no travamento do cronômetro. Portanto, é razoável tomar o desvio médio de disparo igual ao de travamento, ou seja, 2/10s. Porém, há ainda um lapso entre o travamento do cronômetro e o da contagem, cujo desvio médio também pode ser avaliado em 2/10s, conforme medições feitas.

Entenda-se por desvio a diferença entre um valor medido e o valor exato pretendido e, por desvio médio, a média do módulo dos desvios.

Segundo SPIEGEL (1974)⁴⁹ o desvio padrão numa distribuição normal é igual a 0,7979 vezes o desvio padrão (aproximadamente 4/5 deste valor). Sendo assim, e admitindo-se como válida a distribuição normal para os erros cometidos, aos três desvios

médios acima referidos corresponde um desvio padrão de 2,5/10s. Por sua vez, cada um desses três desvios padrões está associado a uma das três parcelas em que se pode dividir o tempo de observação, como é explicado abaixo.

Pode-se considerar que o tempo de contagem t seja a soma de três parcelas distintas:

$$t = t_1 + t_2 + \Delta t, \quad (\text{III.46})$$

sendo que:

t_1 = o intervalo de tempo que vai do disparo do cronômetro até, por exemplo, a metade do tempo de contagem. Nessa parcela o erro está no início, entre se disparar o cronômetro e a contagem possuindo o desvio padrão $S_{t_1} = 2,5/10s$.

t_2 = o intervalo de tempo que se estende do fim da parcela anterior, na metade do tempo de observação, até o tgravamento do cronômetro. Possui erro no final, que é a diferença entre o tempo marcado e o predeterminado, com desvio padrão $S_{t_2} = 2,5/10s$.

Δt = o intervalo de tempo entre o travamento do cronômetro e o da contagem. É em si mesmo, um erro, cujo desvio padrão é $S_{\Delta t} = 2,5/10s$.

A divisão do tempo de contagem nas parcelas acima,, embora inusitada, é perfeitamente válida tanto do ponto de vista matemático como do físico. Das considerações iniciais sobre os erros e das definições das parcelas de tempo acima chegou - se à correspondência das mesmas com os respectivos desvios padrões, que são iguais entre si. Pode-se, agora, estimar o desvio padrão do tempo de observação t .

Considerando-se os erros em t_1 , t_2 e Δt como independentes, pela Teoria dos Erros (BEERS, 1962)⁴ o desvio padrão do tempo de contagem t é dado por :

$$S_t = \sqrt{\left[\frac{\partial t}{\partial t_1}\right]^2 (S_{t_1})^2 + \left[\frac{\partial t}{\partial t_2}\right]^2 (S_{t_2})^2 + \left[\frac{\partial t}{\partial \Delta t}\right]^2 (S_{\Delta t})^2} \quad (\text{III.47})$$

Como as derivadas parciais acima são todas iguais à unidade (ver eq.III.46) e foi considerado $S_{t_1} = S_{t_2} = S_{\Delta t}$ ($=2,5/10s$) tem-se:

$$S_t = S_{t_1} \sqrt{3} \quad (\text{III.48})$$

A equação III.48 fornece, portanto uma estimativa do desvio padrão do tempo de contagem, cujo valor calculado é de $4,3/10s$ ($0,43s$ ou $4,3/600$ minutos), mas que conservativamente foi tomado como $5/10s$, isto é, o valor calculado arredondado para mais.

Construiu-se então a tabela III.4, para uma avaliação do aumento que o erro no tempo provoca no desvio padrão e no erro relativo da taxa de contagem.

Além do desvio padrão do tempo de $5/10s$, estimado acima, empregou-se ainda outros dois, a título, de comparação. Um deles, de $7,5/10s$ ($7,5/600$ min), corresponderia a um desvio médio de $3,5/10s$, em vez dos $2/10s$, antes avaliados para os erros. O outro, de $1s$ ($1/60$ min), estaria relacionado ao desvio médio de $5,8/10s$, o qual só poderia ser resultante de uma boa dose de displicência ou reflexos muito maus do cronometrista.

Segundo a tabela III.4 o que fica patente é que o aumento no erro relativo da taxa de contagem devido ao erro no tempo é desprezível, pelo menos para um desvio padrão em t de até $5/600$ min ($0,5s$), o estimado para os ensaios. O mesmo não ocorre para a faixa de desvios padrões do tempo de mais de $1s$,

TAXA DE CONTAGEM r (cpm)	SEM ERRO NO TEMPO		COM ERRO NO TEMPO					
	r (cpm)	Er	St = 5/600 min		St = 7,5/600 min		St = 1/60 min	
			r(cpm)	Er	r(cpm)	Er	r(cpm)	Er
180	13,4	7,5%	13,5	7,5%	13,6	7,6%	13,7	7,6%
250	15,8	6,3%	15,9	6,4%	16,1	6,4%	16,4	6,5%
500	22,4	4,5%	22,7	4,5%	23,2	4,6%	23,9	4,8%
1.000	31,6	3,2%	32,7	3,3%	34,0	3,4%	35,7	3,6%
2.000	44,7	2,2%	47,7	2,4%	51,2	2,6%	55,8	2,8%
5.000	70,7	1,4%	82,1	1,6%	94,4	1,9%	109,3	2,2%
10.000	100,0	1,0%	130,2	1,3%	160,1	1,6%	194,4	1,9%
15.000	122,5	0,8%	175,0	1,2%	224,0	1,5%	278,4	1,9%
20.000	141,4	0,7%	218,6	1,1%	287,2	1,4%	362,1	1,8%

Tab.III.4 - Acréscimo que o erro no tempo de contagem introduz no desvio padrão e no erro relativo teóricos da taxa de contagem r ($t=1$ min). Er calculado pela equação III.39. r sem erro no tempo: eq.III.32. r com erro no tempo: eq.III.45.

que, todavia, está muito acima daquela que pode ser considerada comum para um cronometrista atencioso e com reflexos normais.

Já a influência do desvio padrão estimado para o tempo no erro de determinação da densidade é bem mais acentuada (tabelas VI.9a-b, item 6.5):

CAPÍTULO IV

A CONTRIBUIÇÃO DESTA PESQUISA

Com a presente pesquisa pretendeu-se estudar a sondagem gama de estacas escavadas, conforme descrita no item 2.3.4, através de uma sonda nuclear à base de raios gama desenvolvida na COPPE. Como seus componentes básicos, foram utilizados uma fonte de cobalto 60 (Co^{60}), um detetor Geiger-Müller e, entre ambos, uma blindagem de chumbo. Como fonte de alta-tensão para o detetor e para registrar a radiação foi empregado um "scaler". Os detalhes relevantes dos aparelhos e equipamentos acessórios utilizados estão nos itens 5.1 a 5.4.

Realizou-se uma avaliação preliminar da sonda por meio de ensaios de laboratório. Para tanto fez-se necessária a preparação de corpos de prova adequados aos seguintes principais fins:

- 1- Determinação do raio de influência da sonda no concreto, isto é, da espessura de concreto ao redor do tubo de acesso efetivamente ensaiada.
- 2- Determinação para a sonda das curvas de resposta "taxa de contagem versus densidade" e, dentre estas, daquela a ser considerada a sua curva de calibração, correspondente à geometria ótima do aparelho para a verificação da integridade.
- 3- Avaliação da influência nas medidas tanto do diâmetro interno como do material do tubo de acesso - PVC ou aço.
- 4- Avaliação da sensibilidade da sonda a defeitos vários no concreto, simulados convenientemente em corpos de prova desse material, e as conseqüentes conclusões sobre o desempenho da sonda e a eficiência do método na verificação da integridade de

estacas escavadas.

Para a obtenção das curvas de resposta da sonda - "taxa de contagem versus densidade" -, foi necessário ensaiar corpos de prova de vários materiais. A escolha desses materiais foi pautada na gama de densidades que se desejava cobrir na calibração (desde a da água à do concreto), na facilidade de obtenção dos materiais, na economia e numa razoável homogeneidade que deveriam os c.p.'s apresentar. Pesados esses fatores duas escolhas foram óbvias: a da água e a do concreto simples. Para as densidades intermediárias chegou-se à conclusão que seriam adequados a brita 1 seca ao ar e o concreto leve de argila expandida. Foram confeccionados, então, 4 c.p.'s, um de cada material. A escolha do concreto simples foi até mesmo obrigatória, uma vez que para uma avaliação do método, seria necessário se obter com a sonda tanto medidas características de c.p.'s com concreto íntegro como outras, estas provenientes de c.p.'s também de concreto mas com diferentes defeitos simulados.

A sonda idealizada para pesquisa, não possuindo colimadores para a fonte e o detetor, ensaiaria um volume axissimétrico ao redor do tubo de acesso, o que condicionou a utilização de corpos de prova cilíndricos, que foram todos confeccionados com 90 cm de altura. Para prover o acesso da sonda ao interior dos corpos de prova previu-se sempre um tubo de acesso central, de PVC ou aço.

Na intenção de se avaliar a influência nas medidas tanto do diâmetro como do material do tubo de acesso foram confeccionados 6 c.p.'s de concreto, sendo 3 com tubos de acesso de PVC em diferentes diâmetros e outros 3 com tubo de aço, em diâmetros próximos daqueles dos tubos de PVC.

Para a determinação do raio de influência da sonda no concreto foi feito um conjunto de 5 c.p.'s desse material com os diâmetros variando de 15 a 55 cm, de 10 em 10 cm, e tubos de acesso de PVC. Moldou-se ainda outro conjunto de 5 c.p.'s, com as mesmas medidas dos anteriores mas possuindo tubos de acesso de aço para se pesquisar o efeito do material do tubo no raio de influência.

Foram simulados defeitos no concreto de 7 c.p.'s, sendo um defeito diferente em cada corpo de prova. Para tanto foram usados tubos de PVC (3 c.p.'s) e bolas de isopor (3 c.p.'s) convenientemente posicionados nos corpos de prova, simulando vazios no concreto. Fez-se ainda um c.p. de concreto com uma junta fria à meia altura, representada por uma camada de concreto leve de isopor. A finalidade dos c.p.'s de concreto com defeito simulado foi a de pesquisar a sensibilidade do método a falhas no concreto.

Foi previsto um corpo de prova de concreto com uma armação de aço adjacente ao tubo de acesso, na intenção de se avaliar sua influência nas medidas em concreto íntegro.

Em todos os c.p.'s, um espalhador de madeira de 18,5 cm de comprimento foi colocado no fundo dos tubos de acesso, de tal modo que a sonda quando assentada sobre ele estivesse na posição de medida. Depois de introduzida a sonda no corpo de prova à ensaiar tomou-se em cada um 6 medidas sucessivas da taxa de contagem correspondente, adotando-se para o valor da mesma sua média aritmética.

No capítulo seguinte passa-se a esclarecer convenientemente detalhes do sistema de medição utilizado e vários pontos relativos aos corpos de prova (tais como suas dimensões, pro-

cedimentos para sua confecção, finalidades e características) ,
necessários para a devida compreensão e interpretação dos ensaii
os, estes apresentados e discutidos no sexto capítulo.

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 - O Sistema de Medição

O sistema de medição consistiu em aparelhos e componentes necessários à detecção e registro da radiação gama utilizada no método. O sistema (Fig.V.1) constou basicamente das seguintes partes:

- um scaler, como contador da radiação e fonte de alta-tensão.
- a sonda nuclear, encerrando o detector, a blindagem e a fonte.
- cabos de conexão.

5.2 - Cabos de Conexão

Como se pode ver na Fig.V.1 foi utilizado um cabo coaxial da Pirelli, modelo RG-58C/U, de $500 \Omega/\text{Km}$, para interligar a sonda e o scaler, passando pela bobina, com a função de levar a alta-tensão ao detetor e fazer com que os pulsos gerados neste pela radiação chegassem ao scaler, sendo então registrados. Este tipo de cabo possui dois condutores coaxiais, tendo-se ligado um ao anodo do detetor e o outro ao catodo, este servindo de terra. Com a bobina pretendeu-se prover um meio adequado para o acondicionamento do cabo. Na intenção de se avaliar o comportamento do sistema de medição em situação tão próxima quanto possível da que ocorria na verificação de uma estaca foi utilizado um cabo coaxial de 50 m de comprimento instalado na bobina. Um outro segmento de 1,5 m serviu para interligar a bobina ao scaler (Fig.V.1).

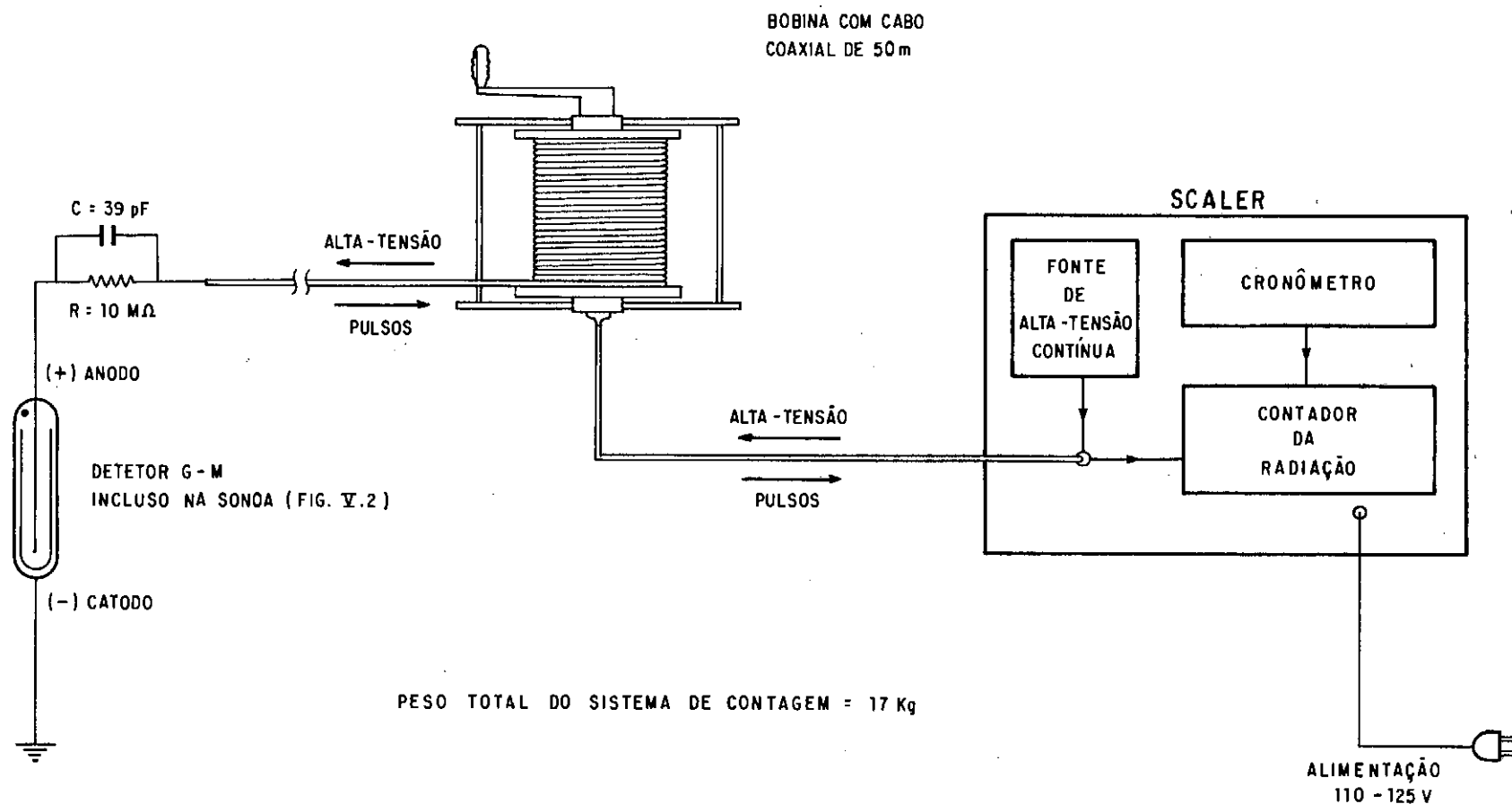


Fig. V.1 - Esquema geral do sistema de contagem utilizado nos ensaios.

5.3 - Características do Scaler

Foi utilizado no sistema de medição ou contagem um scaler da NUCLEAR-CHICAGO CORPORATION (1966).³⁰. É um aparelho bastante compacto e de simples operação, cujo esquema se pode ver na Fig. V.1. Possui as funções de fornecer alta-tensão contínua para o detetor e contar os pulsos da radiação. A contagem é feita com o auxílio de um cronômetro do próprio scaler, que é acionado quando se dispara manualmente a contagem. O cronômetro, ao final do tempo de observação, trava automaticamente a contagem, sendo conservado o resultado. Seguem-se as características relevantes do scaler: TIPO: modelo 5920 d/M - gauge scaler, da NUCLEAR - CHICAGO CORPORATION (1966).³⁰

ESTABILIDADE DA ALTA-TENSÃO: melhor do que 0,1%. A alta-tensão pode ser regulada de 300 a 1400 v, por meio de um ajuste grosso, com incrementos de 100 v, e de um ajuste fino, com incremento contínuo de 0 a 100 v.

ESTABILIDADE DO TEMPO DE CONTAGEM: melhor do que 0,01% a 24°C e, para a faixa de - 18°C a 60°C, melhor do que 0,2%. O cronômetro possui ajuste para contagem de tempo manual e automática, esta para tempos de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1 e 2 minutos.

TEMPO DE RESOLUÇÃO: 10 microsegundos (μ s).

DIMENSÕES: largura = 30,5 cm/altura = 20,3 cm/prof. = 17,8 cm.

PESO: 7,3 Kg.

As características de fábrica acima apontadas, quanto à estabilidade da alta-voltagem e do tempo de contagem, se deterioraram durante esta pesquisa, conforme o apêndice B.1.

5.4 - Componentes da Sonda

5.4.1 - Introdução

A sonda foi projetada tão simples quanto possível, de confecção algo provisória, dado que não era necessário e nem prático que fosse diferente em uma avaliação preliminar do aparelho. Seus componentes básicos são o invólucro, o berço da fonte, a fonte radioativa, a blindagem e o detetor (Fig.V.2).

5.4.2.- O Invólucro

Utilizou-se como invólucro um tubo de alumínio fechado apenas na extremidade inferior, de modo a receber os diversos componentes da sonda, protegê-los e mantê-los guardando entre si uma posição relativa constante (Fig.V.2). O invólucro foi concebido com a extremidade superior mantida sempre aberta, de modo a permitir uma certa facilidade e rapidez nas várias montagens e desmontagens da sonda durante a calibração. Uma alça na extremidade superior do invólucro, com giro livre para os lados, serviu para nela se amarrar uma corda de nylon que, por meio de uma roldana fixada acima do local dos ensaios, permitia o içamento e manipulação da sonda radioativa à distância, ao posicioná-la e retirá-la dos corpos de prova. Para tanto o autor também se utilizou de uma garra mecânica, própria para o manu-seio de material radioativo (apêndice A). O tubo do invólucro foi escolhido com uma espessura de parede de 1,5 mm e diâmetro externo de 38,1 mm, este tendo uma folga de apenas 1,1 mm em relação ao diâmetro interno do tubo de acesso padrão, de PVC (tab. V.5).

5.4.3 - O Berço da Fonte

Um desenho do berço com suas dimensões está na

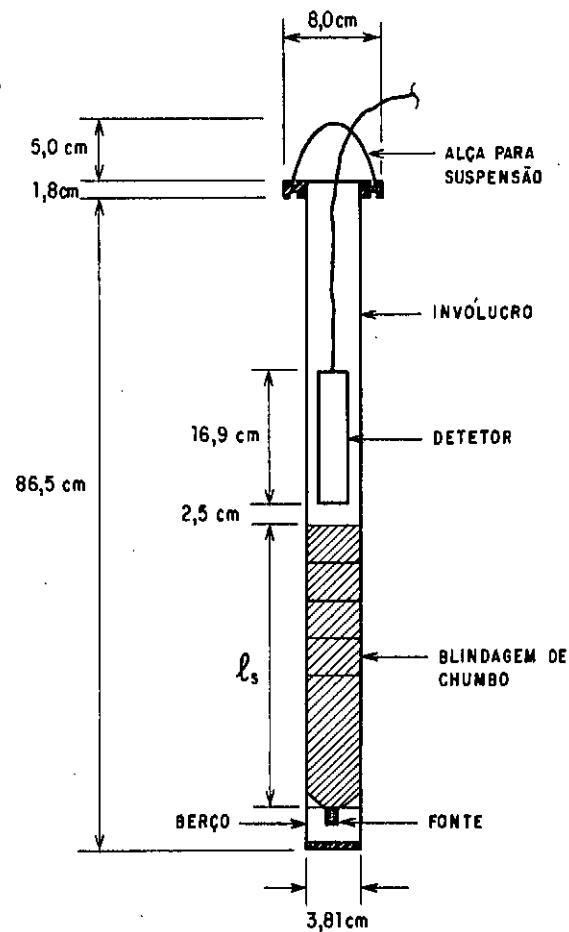


Fig. V.2 - Esquema do invólucro e dos componentes da sonda utilizada nesta pesquisa. Peso máximo da sonda: 3,6 kg ($\ell_s = 29$ cm)

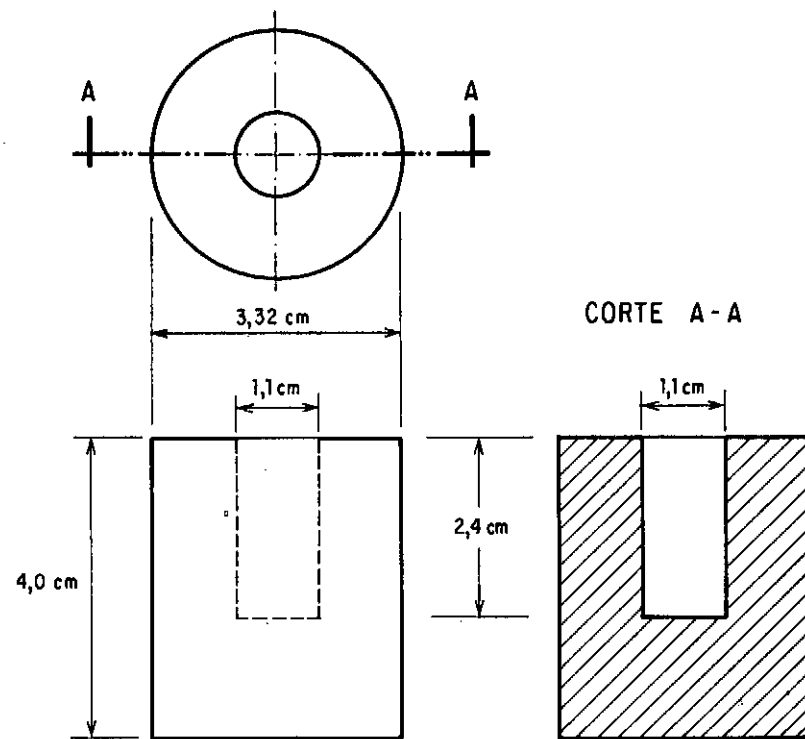


Fig. V.3 - Berço da fonte, torneado em PVC.

Fig.V.3. É uma peça cilíndrica, torneada em PVC e possuindo um o rifício central também cilíndrico para receber a fonte radioati-
va. Sua função foi manter a fonte centrada no eixo do invólucro,
permitindo que irradiasse igualmente em todas as direções, sem co-
limar a radiação.

O berço foi feito em PVC por ser este um material
de baixa densidade ($\sim 1,4$) e, portanto, bastante permeável à ra-
dição.

5.4.4 - A Fonte Radioativa

Utilizou-se uma fonte de Co^{60} , selada dentro de uma
pequena cápsula de aço inoxidável, de dimensões pouco menores que
as do orifício no berço. O cobalto 60 é emissor de raios beta e
gama, com uma meia-vida de 5,26 anos.

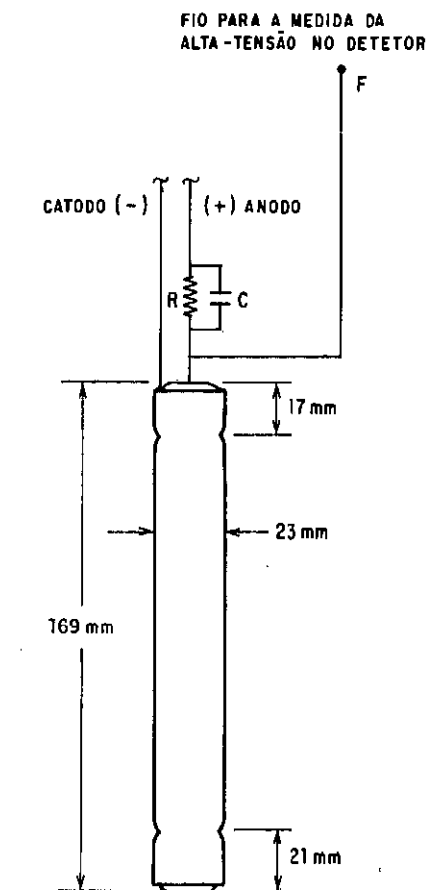
A atividade da fonte foi medida no Instituto de En-
genharia Nuclear (IEN), na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro. Está
dada na tab.V.1, bem como os valores de atividade calculados pa-
ra os dias do início e fim dos ensaios. Estes dois últimos valo-
res foram computados pela eq.III.5, assumindo-se para A_0 a ativi-
dade medida, para t o tempo em anos decorrido desde a data da me-
dição e para λ o valor $0,132 \text{ anos}^{-1}$ (eq.II.4). A tab.V.1 apre-
senta ainda o decréscimo da atividade a partir da data anterior
especificada e os intervalos de tempo correspondentes. Pode-se
perceber claramente o decréscimo indesejado da atividade devido
à meia-vida relativamente pequena do cobalto 60.

SITUAÇÃO E DATA	ATIVIDADE (mCi)	DECRÉSCIMO DA ATIVIDADE DES DE A DATA AN- TERIOR	TEMPO DESDE A DATA AN- TERIOR
medição da atividade 21/07/82	$2,26 \pm 0,03$ (valor medido)	-	-
início dos ensaios: 25/08/83	1,95 (valor calculado)	13,7 %	400 dias ou 1,10 anos
fim dos ensaios 04/11/83	1,91 (valor calculado)	2,05%	71 dias ou 0,195 anos

Tab.V.1 - Atividade da fonte de cobalto 60 empregada.

5.4.5 - A Blindagem

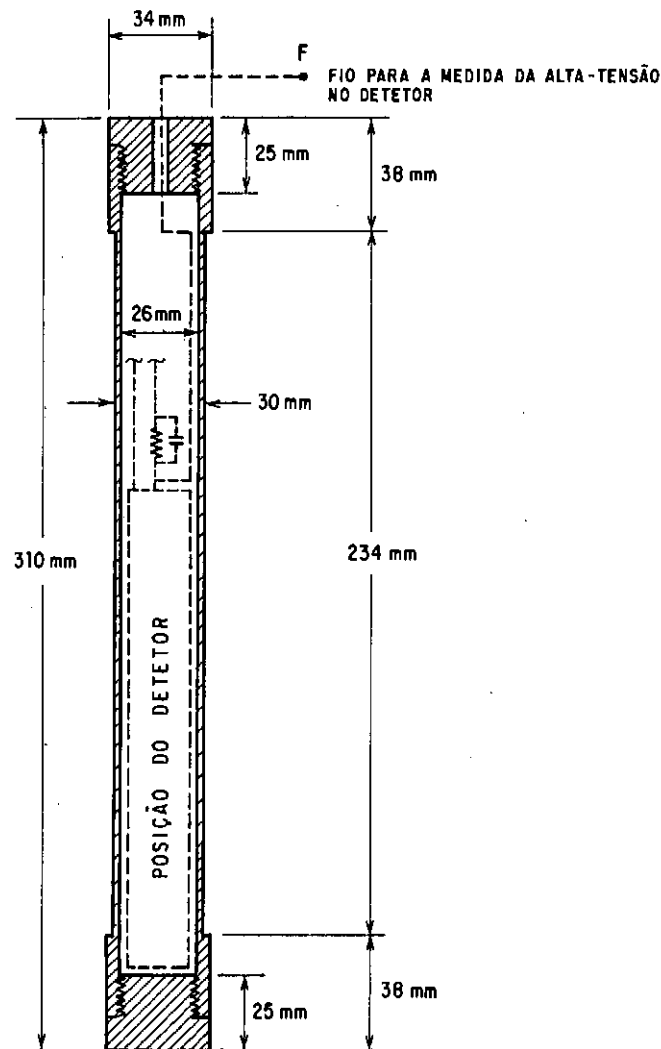
A Fig.V.5 mostra a blindagem de chumbo, utilizada entre a fonte e o detetor. A porção inicial da blindagem, logo acima do berço da fonte, foi torneada nas formas e dimensões da Fig.V.5a, com o extremo inferior em ângulo de 45° para facilitar o trânsito de fótons por regiões mais próximas do tubo de acesso. O comprimento dessa porção inicial, de 13 cm, podia ser aumentado de 4 em 4cm nos ensaios de calibração até um total de 29 cm. Para tanto adicionava-se cilindros de chumbo com 4 cm de altura, formados pela união com fita adesiva de pares de cilindros menores com altura de 2 cm (Fig.V.5b). Sendo o chumbo bastante macio, além da função de unir a fita ainda protegia os cilindros de um desgaste excessivo por atrito no invólucro, durante as várias montagens e desmontagens da sonda na calibração.



(a) - Detetor G-M e circuito R-C associado.

$R = 10 \text{ M}\Omega$
 $C = 39 \text{ pF}$

Fig. V.4



(b) - Corte do invólucro do detetor, torneado em PVC.

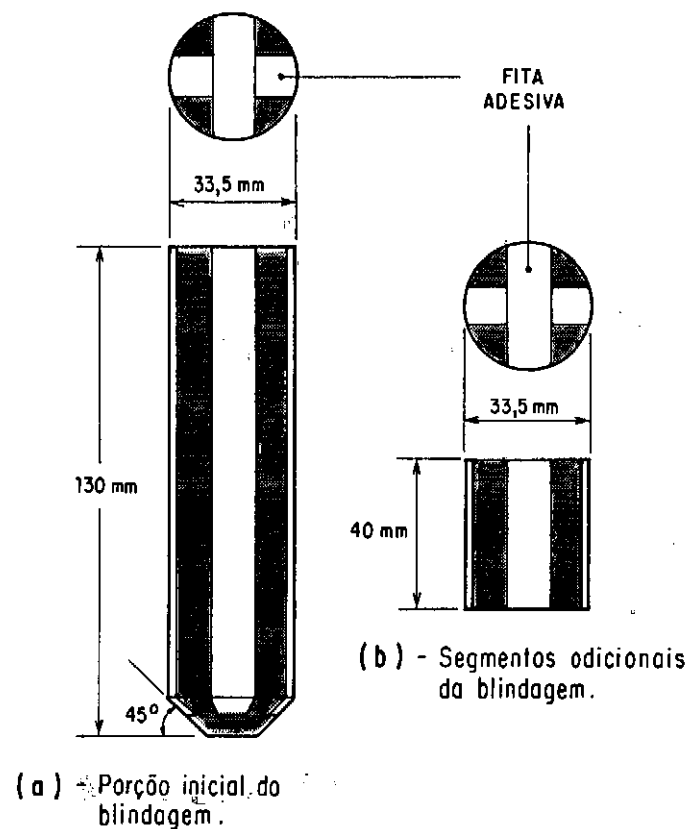


Fig. V.5 - Blindagem de chumbo.

Decidiu-se por um comprimento de blindagem (ls, na Fig.V.2) ajustável de 13 a 29 cm por se ter julgado inicialmente, com base na bibliografia (item 3.2), que a distância ótima fonte-detetor seria dada para uma blindagem nesse intervalo. Essa expectativa de fato se confirmou na calibração, tendo-se obtido uma distância ótima de 27,5 cm, correspondente a um comprimento de blindagem ls de 25 cm.

5.4.6 - O Detetor e seu Invólucro

As dimensões do detetor Geiger-Müller (G-M) utilizado e do seu invólucro são dadas na Fig.V.4. O invólucro do detetor foi confeccionado em PVC, por ser este um material pouco denso ($\rho \sim 1,4$) e portanto bastante permeável à radiação. Sua finalidade foi a de centrar o detetor no invólucro da sonda e de protegê-lo adequadamente contra choques.

Forçosamente, devido à falta de sustentação da alta-tensão fornecida pelo scaler ao detetor (apêndice B.1), resolveu-se medi-la antes e após cada série de 6 contagens dos ensaios, o que foi feito através do fio F, Fig.V.4. A cada medida da tensão fazia-se necessário retirar da sonda o invólucro com o detetor e afastá-lo o suficiente da fonte radioativa (~10m), já que os fótons ao atingirem o detetor provocavam pulsos resípectivos na alta-tensão, diminuindo-a, o que falseava a sua medição. Daí a concepção do invólucro de PVC, para a proteção do detetor contra choques durante essa intensa manipulação.

O detetor utilizado foi um tubo Geiger-Müller, com o aspecto da Fig.V.4a e cujo funcionamento foi comentado no que tem de essencial no item 2.3.4.3b. Suas características relevantes são as seguintes (PHILIPS, 1977)³⁴ :

Espessura: 525 mg/cm²

CATODO Comprimento efetivo: 140 mm

Material: ~ 28% Cr e 72% Fe

GÁS: mistura de neônio, argônio e um gás halogênio

CAPACITÂNCIA entre anodo e catodo: 4,5 pF

PATAMAR: 375 a 475 V (com o circuito especificado no manual)

INCLINAÇÃO DO PATAMAR: 0,15%/V

TEMPO MORTO: 200 μs

Para se determinar a tensão de operação V_0 do detector, aquela correspondente ao meio do patamar (Fig.II.22), foi levantada a sua curva característica utilizando-se do circuito R-C da Fig.V.4a. Esta curva apresentou um patamar indo de 420 a 520V, portanto com uma extensão de 100V, conforme o fabricante, e uma inclinação de 0,08%/V, menor (e melhor) que a especificação de fábrica. Adotou-se uma tensão de operação de 470V. Devido a anomalias que ocorreram posteriormente com o detector (apêndice 8.2), sentiu-se necessidade de novo levantamento da curva característica, que se apresentou desta vez com um patamar de 380 a 480V e inclinação de 0,13%/V. Desde então a nova tensão de operação adotada foi de 430V.

Com base na Fig.II.22 a inclinação do patamar da curva característica foi tomada como (PHILIPS, 1977)³⁴ :

$$I(\%) = \frac{(r_2 - r_1)/0,5(r_1 + r_2)}{V_2 - V_1} \times 100 \quad (V.1)$$

No circuito R-C, Fig.V.1, a resistência R serve para limitar a corrente protegendo o tubo G-M, enquanto que o capacitor C tem a função de transferir para o scaler o pulso de tensão ocasionando por cada raio gama que atinge efetivamente o detector (FRANCISCHINI, 1973)¹². Na montagem empregada nesta pesqui-

sa o circuito R-C se localizou junto ao detetor e, portanto, também dentro do invólucro de PVC (Fig.V.4b).

5.4.7 - As Montagens da Sonda

Nos ensaios de calibração (item 6.5) a sonda foi montada para várias distâncias fonte-detetor, com o intuito de se determinar a sua geometria ótima.

Devido às dimensões do invólucro de PVC do detetor, a distância fonte-detetor l (Fig.III:7) resultou como sendo o comprimento de blindagem mais 2,5 cm. Ou seja:

$$l = l_s + 2,5 \text{ cm} \quad (V.2)$$

Como foram empregados na calibração comprimentos de blindagem de 13, 17,21, 25 e 29 cm, obteve-se para essas montagens da sonda as respectivas distâncias fonte-detetor de 15,5; 19,5; 23,5; 27,5 e 31,5 cm, a cada uma destas correspondendo uma curva de resposta, isto é, uma relação "taxa de contagem líquida r_p versus densidade ρ " (item 6.5).

5.5 - Os Corpos de Prova

5.5.1 - Dimensionamento dos C.P.'s

Ensaiaando-se corpos de prova cilíndricos, com uma espessura de material ao redor do tubo central de acesso menor que o raio de influência da sonda na densidade correspondente, obtem-se taxas de contagem inferiores às referentes ao material considerado. Nessa situação as taxas de contagem são tão menores quanto menor é o diâmetro do corpo de prova e, evidentemente, não são representativas da densidade ensaiada, induzindo a erros na calibração e a conclusões falsas na avaliação do desempenho da

sonda. Logo, deve-se escolher os raios dos corpos de prova algo maiores que o raio de influência da sonda para a densidade do material. Procurou-se então dimensionar os corpos de prova dos vários materiais e os de concreto com defeito simulado com uma certa folga. Com este fim levou-se em conta informações algo vagas da literatura disponível - sobre os raios de influência em função da densidade e da distância fonte-detetor (item 3.2) -, e ainda que:

- 1- a máxima distância fonte-detetor a ser testada na calibração seria de 31,5 cm ($1s = 29cm$);
- 2- a energia dos fótons da fonte de cobalto 60 (1,17 e 1,33Mev) que se empregaria nos ensaios é o dobro da do Cs 137(0,66Mev);
- 3- o raio de influência da sonda certamente não aumenta na mesma proporção da energia dos fótons e da distância fonte-detetor.

Com base nessas informações estabeleceu-se para os c.p.'s das várias densidades e com defeito simulado os diâmetros da tab.V.2, estimados como suficientes para conter os prováveis raios de influência da sonda. Além dos raios de influência medidos (item 6.2), a tab.V.2 apresenta também, para as dimensões dos c.p.'s, o maior raio de influência que a sonda deveria possuir no material (máximo R.I. admitido) para que a perda na taxa de contagem não superasse 5% . Previu-se em cada c.p. um tubo de acesso central para introdução da sonda.

Todos os c.p.'s da pesquisa foram moldados com 90 cm de altura, para que a sonda quando na posição de medida e mesmo montada com a sua maior distância fonte-detetor, 31,5 cm ($1s = 29 cm$), possuisse pelo menos 19 cm de c.p. tanto acima do detetor como abaixo da fonte (Fig.V.6). Para tanto, como se vê

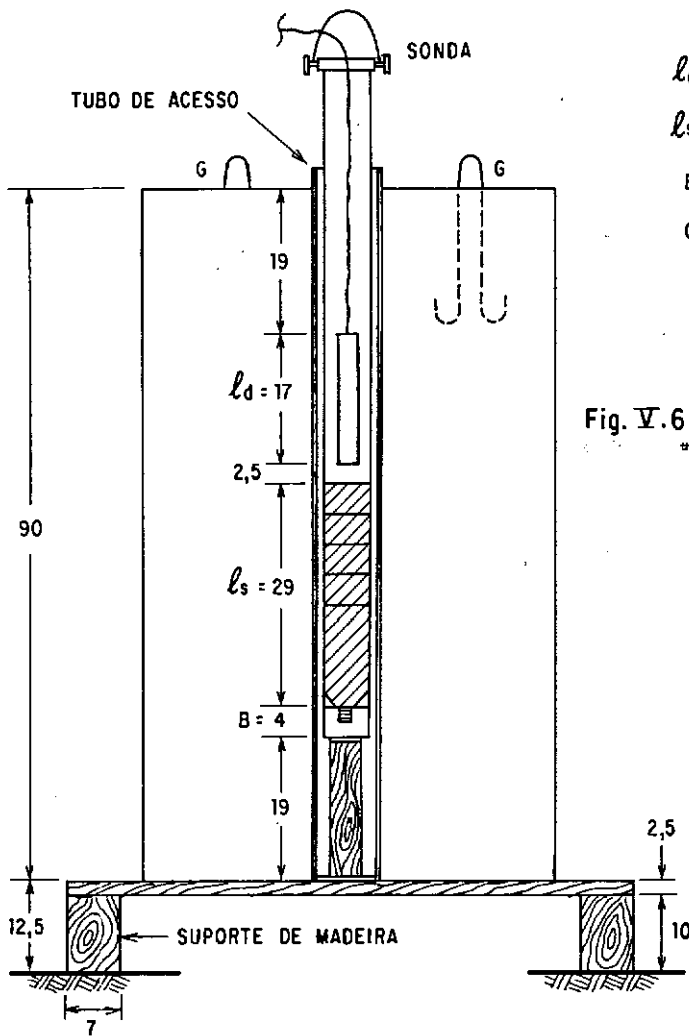
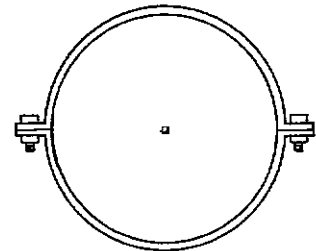


Fig. V.6 - Sonda no posição de medida em um c.p., montada para l_s máximo.

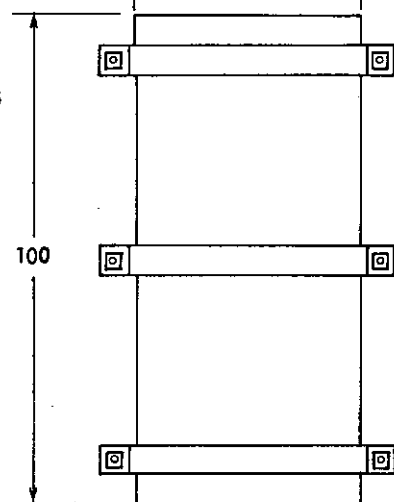
(COTAS EM cm)



DIÂMETRO INTERNO (TAB. V.3)

Fig. V.7 - Aspecto genérico dos moldes utilizados para os c.p.s. Diâmetros constam da tab. V.3.

(COTAS EM cm)



na mesma figura, providenciou-se em todos os c.p.'s um espaçador da madeira de 19 cm de altura no fundo dos tubos de acesso, de modo que a sonda quando assentada sobre ele estivesse sempre na posição de medida. Com isto se conseguiu deixar os ganchos de içamento dos c.p.'s de concreto, com 18 cm de ancoragem, fora do volume de influência e, portanto, com a garantia de não interferirem nas medidas (considerou-se a altura do volume de influência como a distância da porção inferior da fonte ao extremo superior do detetor.

M ATERIAL DO C.P.	DENSIDADE	DIÂMETRO (cm)	MÁXIMO R.I. ADMITIDO (cm)	R.I. MEDIDO (cm)	ALTURA (cm)
Água	1,00	85 e 95	40 e 45	$\leq 40 *$	90
Brita 1	1,44	75	35	-	90
Concreto Leve	1,79	65	30	-	90
Concreto Simples	2,37	45	20	14	90
Concreto c/defeito	-	45	20	14	90
Concreto c/Armação	-	45	20	14	90

Tab.V.2 - Diâmetros adotados nos c.p.'s das várias densidades, suficientes para se evitar perda significativa na taxa de contagem. (* - ver item 6.5.2.3).

5.5.2 - Moldes para os Corpos de Prova

Todos com 1 m de altura mas cada um com um diâmetro interno (Tab.V.3), os moldes foram feitos de duas metades semi-cilíndricos em chapa de aço 1020, de pequena espessura - 1 mm.

Previu-se 3 reforços de ferro 38,1 mm x 9,5mm abrangendo cada metade (Fig.V.7), com a finalidade de dar a necessária rigidez ao conjunto e de através deles unir ambas as partes. A junção foi garantida por 6 parafusos, cada um unindo duas a duas as orelhas opostas dos reforços de cada metade. Diversas chapas de metal serviram de fundo para os moldes, que foram simplesmente assentados sobre as mesmas, sem maiores vínculos. A vedação das juntas do fundo e laterais foi feita pressionando-se cera contra as mesmas pelo lado externo.

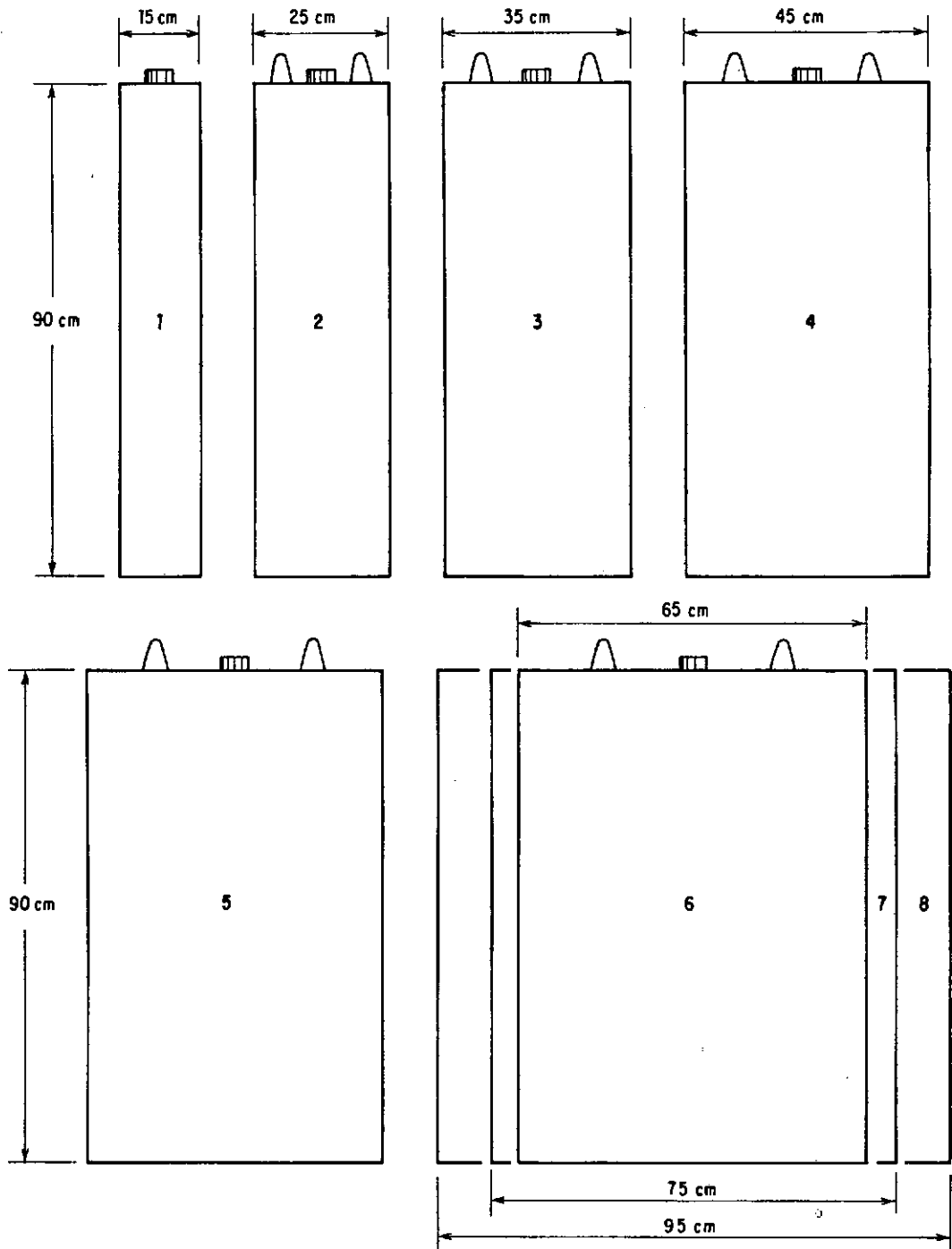
DIÂMETRO INT.(cm)	15	25	35	45	55	65	75	85	95
ALTURA	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nº DE MOLDES	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab.V.3 - Dimensões dos moldes utilizados para os c.p.'s.

5.5.3 - Finalidades e Características dos C.P.'s

5.5.3.1 - C.P.'s para a Determinação do Raio de Influência (R.I.) da Sonda no Concreto Simples.

Para este fim confeccionou-se 2 conjuntos de c.p.'s de concreto, cada um deles com 5 c.p.'s em diâmetros crescentes de 10 em 10 cm, de 15 a 55 cm (tab.V.4a). Um dos conjuntos foi moldado com o tubo de acesso central padrão, de PVC, enquanto o outro recebeu o tubo de acesso menor de aço (Tab.V.5). Utilizou-se tubos de acesso de material diferente nos 2 conjuntos para efeito de confronto dos resultados. Uma visão comparativa dos c.p.'s está na Fig.V.8. De um para outro conjunto mudou pratica -



1,2,3,4 e 5 = c.p.'s concreto simples para determinação da raio de influência da sonda.

6 = c.p. de concreto leve de argila expandida.

7 = c.p. de brita 1 contida pelo molde \varnothing 75 cm.

8 = c.p. de água contida pela malde \varnothing 95 cm.

4,6,7 e 8 = c.p.'s para obtenção da curva de calibração.

Fig. V.8 - Visão comparativo dos c.p.'s dos vários diâmetros.

mente apenas o material do tubo de acesso - PVC ou aço -, sendo que, na realidade, para este material o diâmetro interno do tubo foi pouca coisa maior. Obteve-se para o concreto uma densidade média de 2,37 (item 5.6).

O tubo de acesso de PVC de menor diâmetro foi tomado como o padrão, por permitir condições ótimas de utilização da sonda frente aos demais diâmetros de PVC e de aço (item 5.5.5). O c.p. de concreto com diâmetro de 45 cm e tubo de acesso menor de PVC foi também considerado padrão, tanto por possuir o tubo de acesso padrão como por ser íntegro e ter diâmetro igual aos do c.p.'s com defeito simulado. As medidas nele obtidas foram consideradas como representativas do concreto íntegro. O tubo de PVC padrão, portanto, foi empregado também nos c.p.'s para obtenção da curva de calibração e nos corpos de prova com defeito simulado e armação, descritos a seguir.

Todos os c.p.'s foram moldados com 90 cm de altura.

5.5.3.2 - C.p.'s para Obtenção da Curva de Calibração

Para obtenção da curva de calibração da sonda, cobrindo uma gama de densidades desde aquela da água à do concreto, foram preparados 4 c.p.'s cilíndricos, cada um dos seguintes materiais: água, brita 1 seca ao ar, concreto leve de argila expandida e concreto simples, com as densidades médias respectivas de 1,00; 1,44; 1,79 e 2,37 (item 5.6). Uma visão comparativa dos c.p.'s está na Fig.V.8, com suas características resumidas na Tab.V.4a. Todos os corpos de prova foram confeccionados com o tubo de acesso central padrão, de PVC.

5.5.3.3 - C.p.'s para Estudo do Erro devido à Folga no Tubo de Acesso em Relação à Sonda

Para se avaliar a influência do aumento do diâmetro do tubo de acesso na resposta da sonda e, ainda, estudar como essa influência ocorre conforme o material do tubo, foram moldados 4 c.p.'s de concreto com 45 cm de diâmetro, com tubos de acesso centrais de diâmetro acima do padrão, sendo dois c.p.'s com tubos de PVC e outros dois com tubos de aço. As características desses corpos de prova estão dadas na tab.V.4a, contando da Fig.V.9 os diâmetros internos dos tubos de acesso.

A intenção foi cotejar as medidas obtidas nos 4 c.p.'s acima com aquelas correspondentes ao c.p. padrão e ao c.p. de concreto Ø 45 cm com tubo de acesso menor de aço, concluindo-se sobre o conjunto dos dados.

5.5.3.4 - C.p.'s para Avaliação da Sensibilidade da Sonda a Vários Tipos de Defeito

Todos os 7 c.p.'s com defeito simulado foram feitos em concreto simples Ø 45 cm e com tubo de acesso central padrão, de PVC. Os defeitos consistiram basicamente em vazios no concreto, conseguidos posicionando-se convenientemente nos moldes concreto leve de isopor, tubos de PVC e bolas de isopor, posteriormente envolvidos pelo concreto. Para uma melhor interpretação dos resultados e adequada avaliação da sensibilidade da sonda fez-se em cada c.p. apenas um único defeito, de posição, dimensões e densidade conhecidas, conforme é detalhado a seguir.

Três dos c.p.'s com defeito foram moldados cada um com um vazio no concreto representado por uma bola de isopor, de diâmetro diferente em cada c.p. (7,5; 10 e 15 cm), a

chamada bola-defeito, posicionada a meia altura e tangenciando o tubo de acesso (Tab.V.4a e Fig.V.11).

Três outros c.p.'s de concreto foram confeccionados cada um com um defeito simulado por um tubo padrão de PVC - o chamado tubo-defeito -, lateral e paralelo ao tubo de acesso e distando deste diferentemente em cada c.p.: 0; 6,5 e 13cm, como mostra a Fig.V.12. Nesta e na Tab.V.46 constam maiores detalhes dos corpos de prova.

Foi moldado ainda um c.p. de concreto com uma camada de concreto leve de isopor a meia altura, com 10 cm de espessura e $\bar{\rho} = 1,45$, representando uma junta-fria, isto é, uma camada de concreto com elevada porosidade. Isso foi conseguido substituindo-se toda a brita 1 por um volume menor de pequenas bolas de isopor. Detalhes deste corpo de prova estão na Fig.V.10 e Tab.V.4b.

5.5.3.5 - C.p. para Avaliação do Efeito da Armação da Estaca na Medida em Concreto Íntegro

Com esta intenção foi moldado um c.p. de concreto com 45 cm de diâmetro, trazendo inclusive uma armação de barras de aço, semelhante à de uma estaca (ver Fig. V.14). Mais detalhes do c.p. estão na Tab.V.4b.

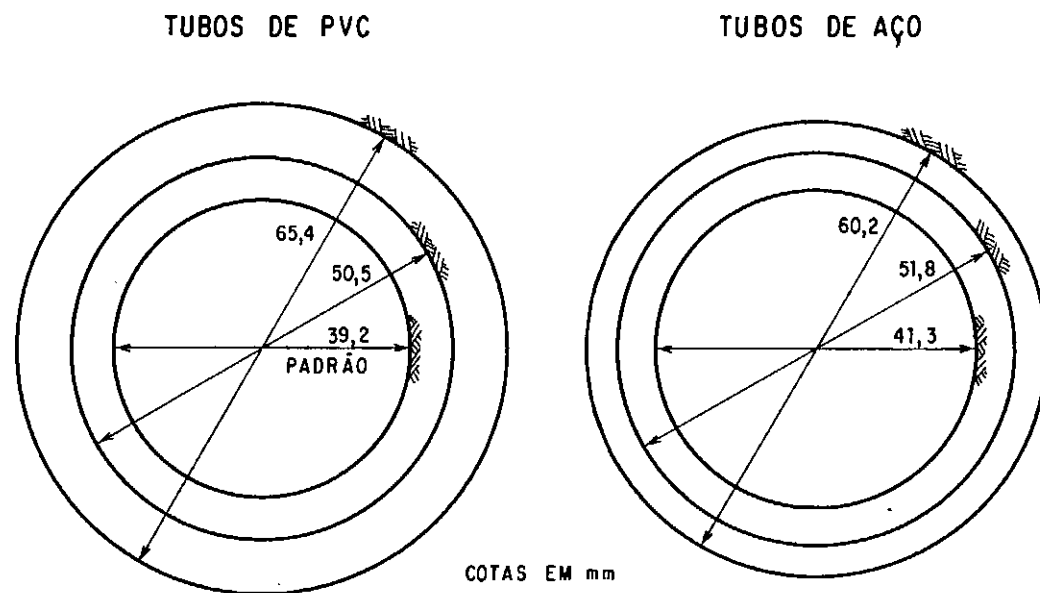


Fig. V.9 - Diâmetros internos dos tubos de PVC e aço, utilizados para avaliação do erro nas medidas devida à folga no tubo de acesso em relação à sonda. Diâmetros em verdadeiro tamanho.

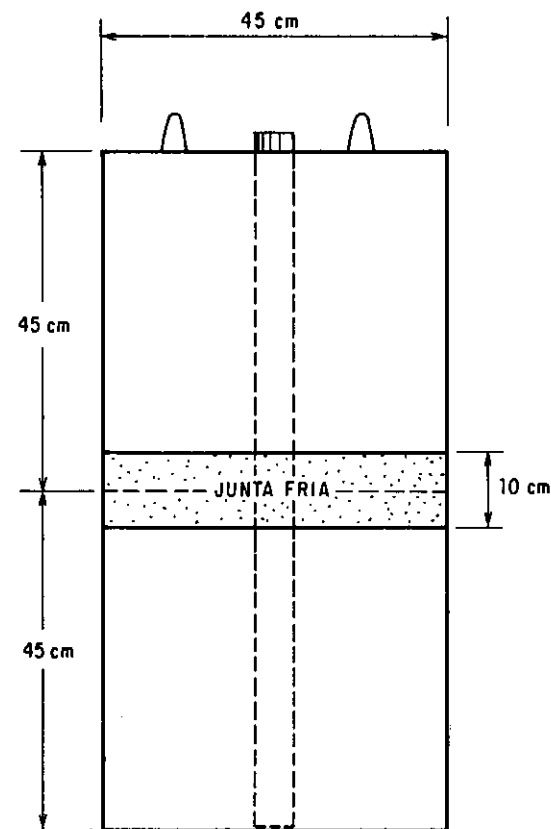


Fig. V.10 - C.p. de concreto com uma junta fria à meio altura, simulada por camada de 10 cm de concreto leve de isopor ($\rho = 1,45$).

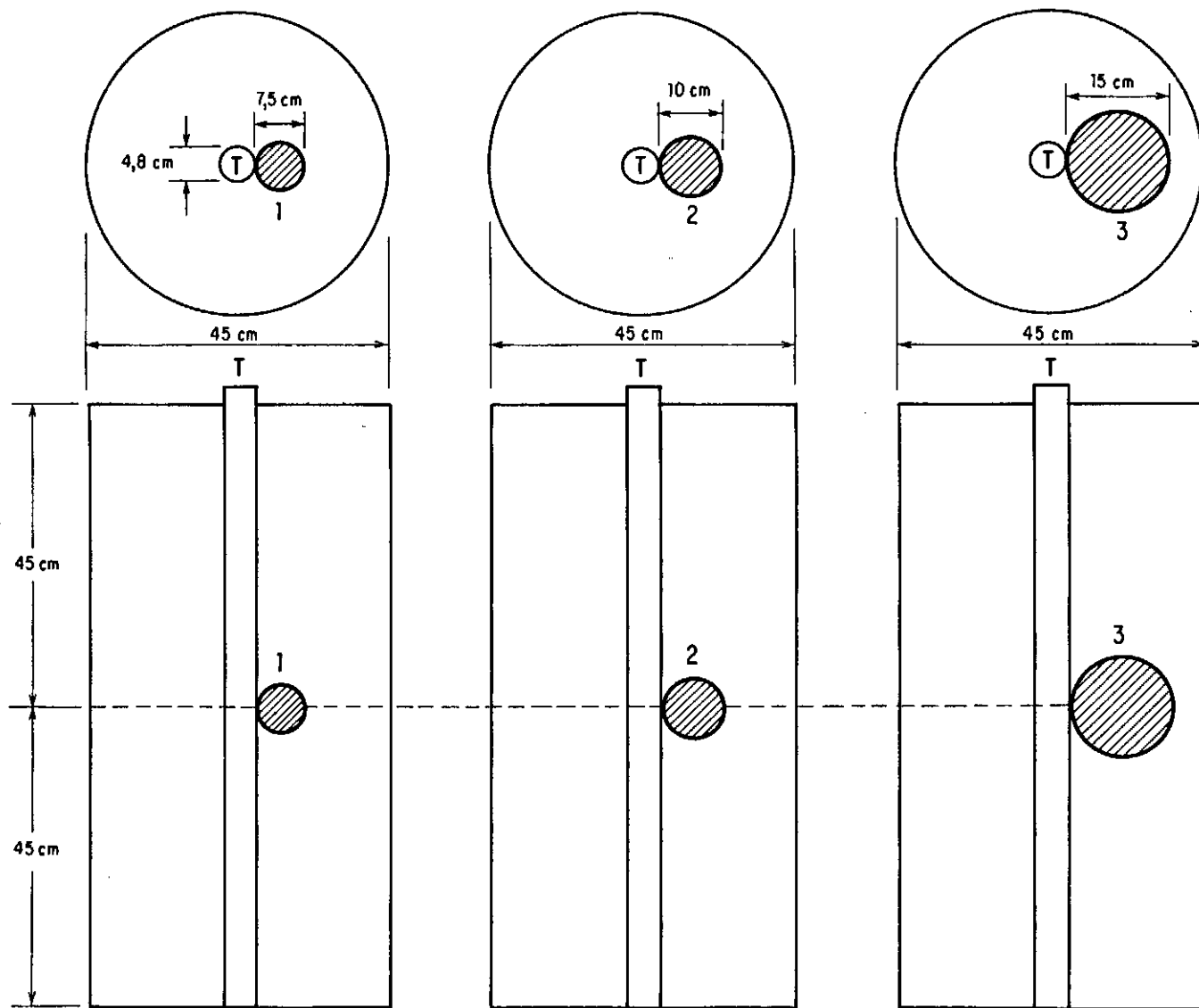


Fig. V.11 - C.p.'s com vazios simulados por bolas - defeito indicadas em hachura.

1, 2 e 3 = Bolas - defeito de isopor

T = Tubo de acesso padrão

Escala = 1:100

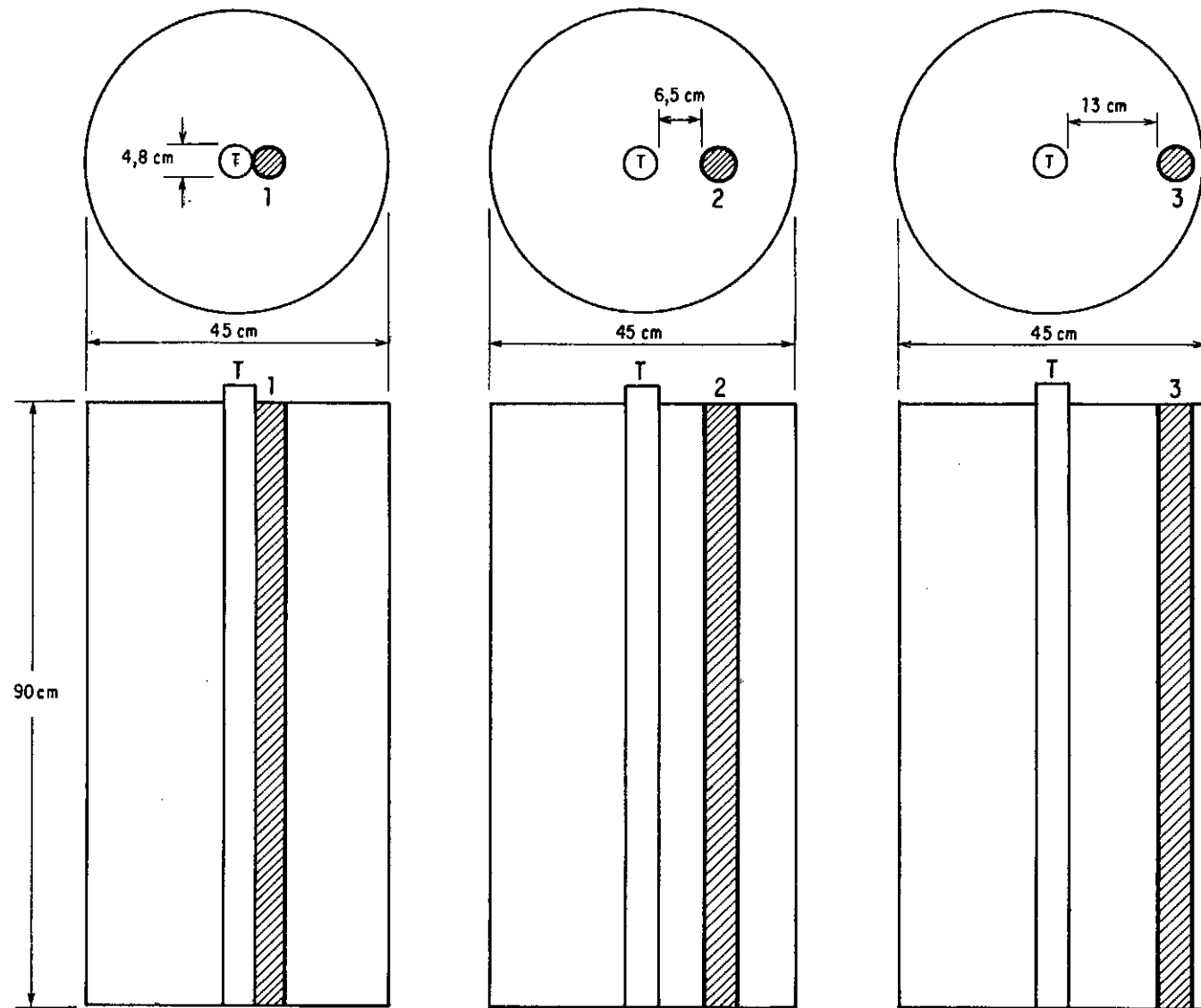


Fig. V.12 - C.p.'s com vazios simulados por tubos-defeito indicados em hochuro .

1,2 e 3 = Tubos-defeito tipo padrão, de PVC.

T = Tubo de acesso padrão.

Escola = 1:100

Fig. V.13 - Vista de um centralizador superior do tubo de acesso.
Os centralizador inferiores foram feitos sem os ganchos.

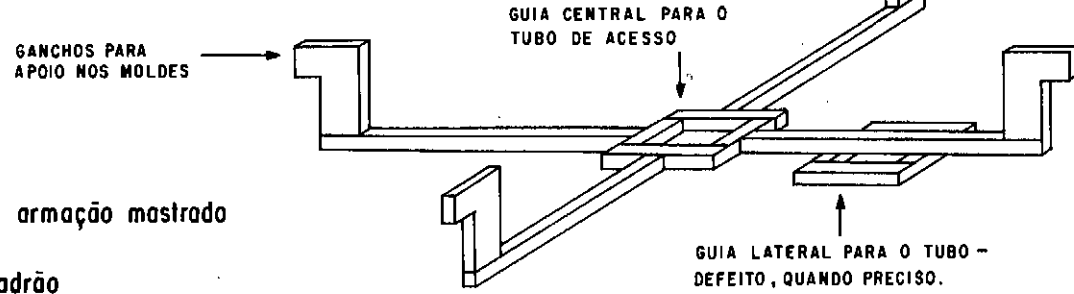
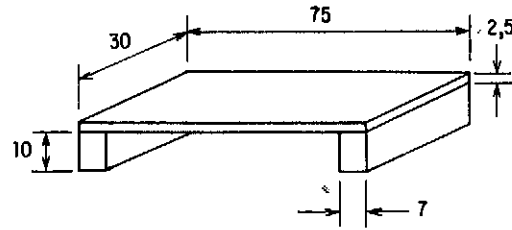
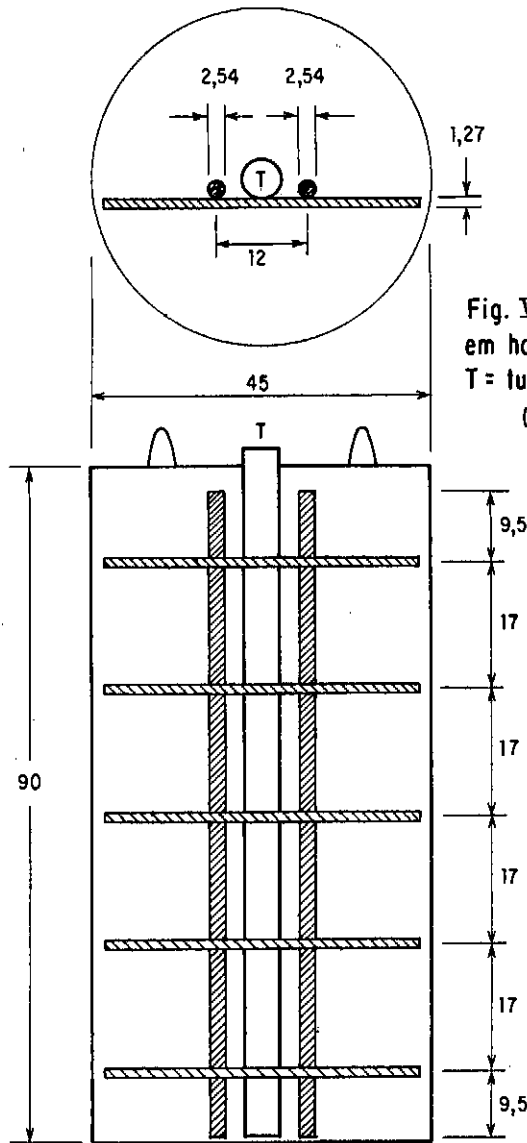
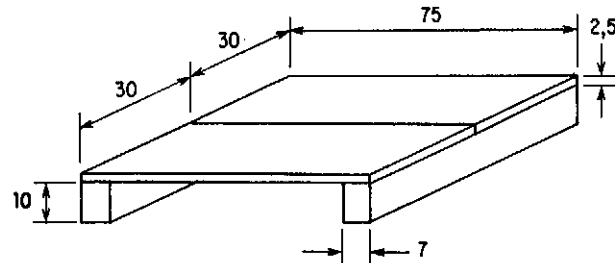


Fig. V.14 - C.p. com armação mostrada em hochurado.
T = tubo de ocesso padrão
(COTAS EM cm)



(a) - Suporte de madeira para c.p.'s
de \varnothing até 55 cm.

(COTAS EM cm)



(b) - Suporte de madeira para c.p.'s
de \varnothing acima de 55 cm.

Fig. V.15

FINALIDADE DOS C.P.'s	MATERIAL E	Ø(cm)	TUBO DE ACESSO	CARACTERÍSTICAS DOS C.P.'s
Obtenção da curva de calibração (e mais o c.p. de concreto Ø 45 cm*)	Água 1,00	85 e 95	Padrão, de PVC	C.P.'s Íntegros
	Brita 1 1,44	75		
	Concreto Leve 1,79	65		
Determinação do raio de influência da sonda no concreto, em C.P.'s com tubos de acesso de PVC e de aço	Concreto simples 2,37	15	Padrão, de PVC	C.P.'s Íntegros
		25		
		35		
		45*		
		55		
	Concreto simples 2,37	15	Menor de Aço	C.P.'s Íntegros
		25		
		35		
		45		
		55		
Avaliação do erro causado pela folga no tubo de acesso em relação à sonda, em função do material do tubo	Concreto simples 2,37	45	Médio de PVC	C.P.'s Íntegros
		45	Maior de PVC	
		45	Médio de Aço	
		45	Maior de Aço	

Tab.V.4a - Finalidades e características dos c.p.'s utilizados nesta pesquisa.

CORPOS DE PROVA COM DEFEITO SIMULADO E ARMAÇÃO				
DINALIDADE DOS C.P.'s	MATERIAL E	Ø(cm)	TUBO DE ACESSO	CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS E ARMAÇÃO
Avaliação da sensibilidade da sonda a vários tipos de defeito	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Tubo padrão de PVC paralelo e adjacente ao tubo de acesso
	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Tubo padrão de PVC paralelo e a 6,5cm do tubo de acesso
	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Tubo padrão de PVC paralelo e a 13 cm do tubo de acesso
	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Bola de isopor Ø7,5 cm adjacente ao tubo de acesso
	Concreto Simples	45	Padrão, de PVC	Bola de isopor Ø 10 cm adjacente ao tubo de acesso
	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Bola de isopor Ø 15 cm adjacente ao tubo de acesso
	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Camada de 10cm de concreto leve($\rho = 1,45$) a meia altura
Efeito da armação na medição da em concreto íntegro	Concreto Simples 2,37	45	Padrão, de PVC	Armação, como ade uma estaca, adjacente ao tubo de acesso

Táb.V.4b - Finalidades e características dos c.p.'s com defeito simulado e armação.

5.5.4 - Procedimentos na Confeção dos C. P.'s

Conforme o item anterior, na confecção dos corpos de prova foram utilizados basicamente 4 materiais: concreto simples, concreto leve de argila expandida (cinazita), brita 1 e água. Empregou-se também um pequeno volume de concreto leve de isopor simulando uma junta fria num dos c.p.'s, além de bolas de isopor e tubos de PVC inclusos em outros c.p.'s de concreto, simulando vazios.

O concreto simples foi produzido com brita 1, areia lavada de média a fina e cimento portland CP-320. Praticou-se sempre o traço 1:2:3,5, com um fator água-cimento $x = 0,52$, segundo recomendação de LOBO CARNEIRO (1953)²⁵ para adensamento vibratório e diâmetro máximo do agregado de 19 mm (brita 1). Para garantir uma boa homogeneidade do concreto resolveu-se preencher os 90 cm de altura dos c.p.'s em 6 camadas sucessivas de 15 cm cada uma. Foi realizado adensamento mecânico com um vibrador de 1.500 r.p.m. Durante as concretagens foram retiradas diversas amostras (corpos de prova cilíndricos) de 15 x 30 cm para se avaliar a densidade do concreto ($\bar{\rho} = 2,37$) e a sua resistência (Tab. V.6a-e).

Os tubos de acesso, todos com 92,5 cm de altura, foram posicionados nas formas através de dois centralizadores feitos de sarrafos de madeira de 12 mm, um superior e outro inferior (Fig.V.13). O centralizador superior apoiava-se por meio de garras nas bordas do molde, enquanto o inferior, sem as garras, simplesmente se assentava sobre a chapa do fundo, tornando-se incluso no corpo de prova. A guialateral mostrada na Fig.V.13 foi prevista apenas no caso dos c.p.'s com tubos-defeito, para que estes fossem mantidos na posição desejada.

Nos c.p.'s com bolas-defeitos as mesmas foram fixadas aos tubos de acesso de modo adequado, sendo a concretagem realizada cuidadosamente para não deslocá-las.

A fim de remover os c.p.'s do local de concretagem, após decorrido um prazo mínimo de 7 dias, previu-se para cada corpo de prova um par de ganchos inserido em seu extremo superior (Fig.V.6). Levantava-se então os c.p.'s pelos ganchos com uma talha elétrica, posicionando-os sobre suportes de madeira adequados (Fig.V.15), de modo que pudessem ser levantados por baixo por um carro hidráulico e por este transportados. O carro hidráulico foi imprescindível no traslado e posicionamento dos c.p.'s no local de ensaio, haja visto o grande peso dos mesmos (Tab.V.6a-e).

Para o c.p. de concreto com uma junta-fria simulada por concreto leve de isopor o molde foi preenchido em 5 camadas, sendo duas abaixo e duas acima daquela da junta-fria, esta com 10 cm de espessura. O traço do concreto leve de isopor foi determinado por tentativas. A densidade média do concreto leve de isopor foi de 1,45 (item 5.6).

Moldou-se um único c.p. de concreto leve de argila expandida (cinazita), para o qual se obteve a densidade média de 1,79 (item 5.6). Este material, após um processo de tentativas, em que se procurou obter densidade em torno de 1,8 e trabalhabilidade adequada ao adensamento vibratório, foi preparado na proporção em peso de 1:2:0,67* (o asterisco indica o uso de agregado leve) e $x = 0,525$.

O c.p. de brita 1 foi confeccionado preenchendo-se o molde de 75 cm de diâmetro interno com brita 1 seca ao ar, o

que foi feito despejando-se a brita com uma colher apropriada, fazendo-o sempre uniformemente e de uma altura de 10 a 15 cm. A densidade média determinada para a brita 1 foi de 1,44 (item 5.6).

Foram feitos dois c.p.'s de água, nos diâmetros de 85 a 95 cm. Para tanto os moldes com esses diâmetros foram vedados pressionando-se cera contra as juntas do fundo e laterais, pelo lado de dentro. Posicionados os centralizadores e o tubo de acesso padrão, os moldes puderam então ser preenchidos com água (ρ considerada igual a 1,00) até a altura de 90 cm. Na calibração da sonda foi utilizado apenas o c.p. Ø 95 cm, embora ambos tenham sido ensaiados em uma avaliação ainda que incompleta do raio de influência da sonda na água.

5.5.5 - Características do Tubos de Acesso

As características dos tubos de acesso consideradas relevantes para a pesquisa estão resumidas na tabela V.5. Foi pesquisado o emprego tanto de tubos de acesso de PVC rígido como de aço sem costura, com o objetivo de se estudar as possibilidades técnicas de cada tipo e decidir pelo mais adequado à verificação da integridade de estacas escavadas. PREISS e CAISERMAN (1975)⁴² e PREISS et alii (1978)⁴³ já haviam utilizado tubos de aço em estacas, daí o interesse em avaliá-los nesta pesquisa, tendo-se empregado tubos de aço sem costura em vários corpos de prova. Paralelamente surgiu a idéia de se avaliar também o uso de tubos de PVC rígido como tubos de acesso, uma vez que os mesmos são muito mais leves, mais fáceis de encontrar, mais baratos e de material bem menos denso que o aço, esta última uma característica que permite a obtenção de taxas de contagem mais elevadas e, portanto, com menor erro relativo (item 3.5). Devido a estes fatores o tubo de PVC de menor diâmetro, tabela V.5, foi

adotado como o tubo de acesso padrão. Decidido assim, a sonda foi confeccionada com uma pequena folga entre o seu diâmetro externo e o diâmetro interno do tubo padrão, de acordo com as exigências e motivos expostos no item 2.3.4.6b, visando condições ótimas de utilização do aparelho. Essa folga consta da tab.V.5.

Os tubos de diâmetro acima do padrão, tanto de PVC como de aço (tabela V.5), bem como o tubo de aço de diâmetro próximo do padrão, foram utilizados em corpos de prova íntegros de concreto, com diâmetro de 45 cm, para se determinar a influência nas medidas do diâmetro interno do tubo e do seu material (item 6.6).

DIÂMETRO DE REFERÊNCIA (Pol.) MATERIAL	DIÂMETRO EXTERNO NOM./REAL (m m)	DIÂMETRO INTERNO NOM. (m m)	DIÂMETRO INTERNO REAL (m m)	FOLGA EM RELAÇÃO À SONDA (m m)	ESPESSURA DA PAREDE		PESO (N/m)
					NOM. (m m)	REAL (m m)	
1 1/2 PVC (Padrão)	48/48,0	-	39,2	1,1	4,4	4,5	8,7
2 PVC	60/60,1	-	50,5	12,4	4,7	4,9	11,6
2 1/2 PVC	75/75,0	-	65,4	27,3	4,7	4,9	15,0
- Tubo Menor de Aço	48,3/47,6	40,9	41,3	3,2	3,7	3,4	40
- Tubo Médio de Aço	60,3/60,2	52,5	51,8	13,7	3,9	4,4	55
- Tubo Maior de Aço	73,0/72,7	62,7	60,2	22,1	5,2	6,2	90

Tab.V.5 - Características dos tubos de acesso, de PVC e de aço sem costura, utilizados nos corpos de prova. A folga referida na tabela é do diâmetro interno dos tubos em relação ao diâmetro externo da sonda. DENSIDADE DO PVC = 1,4. DENSIDADE DO AÇO = 7,8

5.6 - Determinação da Densidade dos Materiais:

Nas curvas de calibração, para obter densidades na faixa vai daquela da água à do concreto, foram empregados 4 materiais nos copos de prova: água, brita 1 seca ao ar, concreto leve de argila expandida e concreto simples.

Características da medição das densidades dos concretos simples e leve impuseram para esses valores um máximo de 3 algarismos significativos, que foram então respeitados também para as densidades dos demais materiais, que poderiam ter sido obtidos com maior precisão.

Para a brita 1 seca ao ar a densidade foi obtida através do peso específico aparente, estimado segundo procedimento normalizado pelo MB-214. Foram realizadas 5 determinações sucessivas da densidade, com os seguintes correspondentes valores, guardados os algarismos significativos: 1,436; 1,432; 1,477; 1,431 e 1,436. Estes valores forneceram uma média de 1,442, ou 1,44, sendo esta a densidade adotada para a brita 1. O desvio padrão da série de 5 medidas foi de 0,0195, ou 0,01.

As densidades dos concretos simples e leve foram determinadas, isto é, não pesando os próprios corpos de prova, mas através de amostras de 15 cm x 30 cm extraídas durante as contagens dos C.P.'s. Para uma maior representatividade procurou-se distribuí-las igualmente entre as betonadas de cada concretagem. Constam das tabelas V.6a-e os valores determinados das densidades (ρ) e resistência (f_{cj}), bem como as idades e número de amostras por concretagem, respeitados os algarismos significativos. Para a densidade do concreto simples foi adotado o valor de 2,37, média da densidade de todas as amostras, com um desvio

padrão de 0,02. As tabelas V.6a-e fornecem ainda os C.P.'s moldados em cada concretagem.

Da mesma forma, obteve-se para o concreto leve de argila expandida uma densidade de 1,79 média de 8 amostras, com desvio-padrão de 0,02 (tab.V.6e).

Para o concreto leve de isopor o mesmo procedimento forneceu a densidade média de 1,45 correspondente a 3 amostras com densidades de 1,46; 1,44 e 1,46, cujo desvio padrão foi igual a 0,01. As resistências f_{cj} das amostras, determinadas com 13 dias de idade, foram respectivamente de 4,2; 6,3 e 4,8 MPa, com uma média de 5,1 MPa.

Posteriormente, após a moldagem de todos os C.P.'s, surgiu também a possibilidade de uma medida direta da densidade dos concretos simples e leve, através da pesagem dos próprios corpos de prova em duas "load-cells" do Laboratório de Estruturas da COPPE, uma com capacidade de até 5.000N e a outra para até 50.000N. Medidos e pesados os c.p.'s, as respectivas densidades ρ_1 foram calculadas constando os resultados das tabelas V.6a-e, que apresentam também o peso dos corpos de prova. Porém, uma análise dos erros envolvidos nos processos direto e indireto revelou que o primeiro foi bem mais incorreto, razão pela qual os valores de densidade do processo indireto é que foram os adotados como representativos.

CONCRETO SIMPLES - TRAÇO 1:2:3,5 - x = 0,52									
Ordem e data de concretagem	C.P.'s para ensaio			Amostras: c.p.'s de 15cm x 30cm			$\bar{\rho}$ $\bar{f}_{cj}(\text{MPa})$		
	$\varnothing(\text{m})$	Peso (N) ρ_1	Tipo do C.P.	Rompimento: idade e data	Densidade ρ	f_{cj} (MPa)			
1ª Concretagem 25/01/83	0,15	329 2,32	Íntegro, com tubo de acesso de PVC	13 dias 07/02/83	2,34	16,3	2,34 18,2		
	0,25	1000 2,35			2,33	20,3			
	0,35	1980 2,32			2,37	16,8			
	0,45	3270 2,32			2,34	17,2			
	0,55	5040 2,37			2,33	17,7			
					2,35	21,2			
2ª Concretagem 04/02/83	0,15	334 2,34	Íntegro, com tubo de acesso de PVC	7 dias 11/02/83	2,38	10,3	2,38 13,2		
	0,25	1010 2,38			2,38	8,0			
	0,35	2000 2,37			2,37	14,0			
	0,45	3320 2,34			2,38	16,3			
	0,55	5110 2,38			2,38	17,3			

Tab.V.6a - Densidade do concreto simples medida direta (C.P.'s para ensaio - ρ_1) e indiretamente (amostras - ρ) para as várias concretagens, com os valores de f_{cj} .

CONCRETAGEM SIMPLES - TRAÇO 1:2:3,5 - $\alpha = 0,52$

Ordem e data da concretagem	C.P.'s Para Ensaio			Amostras:c.p.'s de 15cm x 30cm			$\bar{f}_{cj}^{\bar{p}}$ (MPa)
	\emptyset (m)	Peso (N) P_1	Tipo do C.P:	Rompimento: idade e da- de	Densidade ρ	f_{cj} (MPa)	
3ª Concretagem 11/02/83	0,45	3350	Com tubo de Acesso de PVC Médio	13 dias 24/02/83	2,38	23,5	2,37
		2,39			2,36	23,3	23,4
4ª Congretagem 04/03/83	0,45	3340	Com tubo de Acesso de PVC Grande	14 dias 18/03/83	2,41	24,6	2,40
		2,40			2,39	23,2	23,9
5ª Congretagem 11/03/83	0,45	3380	Com tubo de Acesso de aço Médio	7 dias 18/03/83	2,40	21,3	2,42
		2,41			2,43	29,3	25,3
6ª Concretagem 17/03/83	0,45	3350	Com tubo de Acesso de aço Grande	11 dias 28/03/83	2,41	28,2	2,41
		2,39			2,40	31,5	29,8
7ª Concretagem 25/03/83	0,45	3350	Com Tubo-Defei- to Adjacente	10 dias 04/04/83	2,36	23,6	2,38
		2,38			2,40	24,6	24,1

Tab.V.6b - Densidade do concreto simples medida direta (C.P.'s para ensaio - ρ_1) e indiretamente (amostras- ρ) para as várias concretagens, com os valores de f_{cj} .

CONCRETO SIMPLES - TRAÇO 1:2:3,5 - x = 0,52							
Ordem e data da concretagem	C.P.'s Para Ensaio			Amostras: c.p.'s de 15cm x 30cm			$\bar{\rho}$ $\bar{f}_{cj}(\text{MPa})$
	\emptyset (m)	Peso (N) ρ_1	Tipo do C.P.	Rompimento: idade e data	Densidade ρ	f_{cj} (MPa)	
8ª Concretagem 30/03/83	0,45	3370 2,41	Com tubo-defeito a 6,5 cm	7 dias 06/04/83	2,38	22,3	2,40
					2,41	24,0	23,2
9ª Concretagem 08/04/83	0,45	3410 2,40	Com bola-defeito média	7 dias 15/04/83	2,37	24,0	2,38
					2,38	24,1	24,0
10ª Concretagem 15/04/83	0,45	3300 2,36	Com bola-defeito grande	10 dias 25/04/83	2,37	19,6	2,38
					2,40	18,1	18,8
11ª Concretagem 29/04/83	0,45	3420 2,39	Com bola-defeito pequena	7 dias 06/05/83	2,37	24,1	2,37
					2,37	20,9	22,5
12ª Concretagem 06/05/83	0,45	3320 2,39	Com tubo-defeito a 13 cm	14 dias 20/05/83	2,37	31,2	2,38
					2,39	30,7	31,0

Tab.V.6c. - Densidade do concreto simples medida direta (C.P.'s para ensaio - ρ_1) e indiretamente (amostras - ρ) para as várias concretagens, com os valores de f_{cj} .

CONCRETO SIMPLES - TRAÇO 1:2:3,5 - x = 0,52							
ORDEN E DATA DA CONCRETA- GEM	C.P.'s PARA ENSAIO			AMOSTRAS: c.p.'s de 15cm x 30cm			$\bar{\rho}$ fcj(MPa)
	Ø (m)	Peso(N) P_1	Tipo do C.P.	Rompimento: idade e data	Densidade ρ	fcj (MPa)	
13ª Concretagem 19/05/83	0,45	3170 2,36	com junta fria	13 dias 01/06/83	2,36	24,3	2,35 23,8
					2,39	30,0	
					2,34	23,3	
					2,36	21,9	
					2,31	19,4	
15ª Concretagem 13/07/83	0,45	3400 2,37	com armadura	9 dias 22/07/83	2,36	22,3	2,37 24,3
					2,38	26,3	
Densidade Média do Concreto Simples segundo as Amostras retiradas: $\bar{\rho} = 2,37$							

Tab.V.6d - Densidade do concreto simples medida direta (c.p.'s para ensaio - ρ_1) e indiretamente (amostras - ρ) para as várias concretagens, com os valores de fcj.

CONCRETO LEVE DE CINAZITA - TRAÇO 1:2:0,67* - x = 0,525							
ORDEN E DATA DA CONCRETAGEM	C.P.'s PARA ENSAIO			AMOSTRAS: c.p.'s de 15cm x 30cm			- $\bar{\rho}$ fcj (MPa)
	\emptyset (m)	Peso (N) ρ_1	Tipo do C.P.	Rompimento: idade e data	Densidade ρ	fcj (MPa)	
14ª Concretagem 17/06/83	0,65	5170	De Concreto Leve de Ar- gila Expandi- da (cinazita)	35 dias 22/07/83	1,75	20,9	1,79
					1,81	24,7	
					1,79	24,9	
					1,80	22,8	
					1,79	22,2	
					1,78	24,6	
					1,82	22,2	
					1,79	24,4	23,3
		1,76					

Tab.V.6e - Densidade do concreto leve de cinazita medida direta (c.p.'s para ensaio - ρ_1) e indiretamente (amostras - ρ) para as várias concretagens, com os valores de fcj.

5.7 - O Ajuste das Curvas de Resposta pelo Método dos Mínimos Quadrados

Aos pontos para as curvas de resposta, obtidos experimentalmente (item 6.5), procurou-se ajustar curvas que os descrevessem de maneira adequada. Com essa intenção foram pesquisadas funções que, além de apresentarem coeficientes de correlação elevados quando ajustadas, também tivessem o comportamento genérico que se deve esperar para a resposta de uma sonda do tipo estudado (item 3.3). Os parâmetros dessas funções foram determinados pelo método dos mínimos quadrados.

Dentro dessa linha de raciocínio fez-se a interpolação da equação da reta, da equação III.9 e da equação III.10 aos pontos obtidos para as várias curvas de resposta, adotando-se em cada caso a equação que forneceu o melhor ajuste (item 6.5), isto é, apresentou o maior coeficiente de correlação.

Os coeficientes de correlação C_c foram calculados pela expressão geral seguinte, dada por SPIEGEL (1974)⁴⁹ :

$$C_c = 1 - \frac{(y - y_{est})^2}{(y - \bar{y})^2} \quad (V.3)$$

y_{est} = valores de y segundo a curva ajustada

y = valores experimentais

\bar{y} = média aritmética dos valores experimentais

A seguir, segundo o método dos mínimos quadrados, apresenta-se as expressões dos parâmetros das equações utilizadas nos ajustes. Nas considerações abaixo r é a taxa de contagem (total ou líquida) medida para a densidade ρ , sendo N o número de valores de r .

I) Equação a ajustar: $r = A \cdot \rho + B$

$$S = \sum [r - (A \cdot \rho + B)]^2$$

Condições de mínimo para S:

$$1) \frac{\partial S}{\partial A} = A \cdot \sum \rho^2 + B \cdot \sum \rho - \sum \rho \cdot r = 0$$

$$2) \frac{\partial S}{\partial B} = A \cdot \sum \rho + NB - \sum r = 0$$

Resolvendo o sistema acima para A e B tem-se:

$$A = \frac{N \cdot \sum \rho \cdot r - (\sum \rho) \cdot (\sum r)}{N \cdot \sum \rho^2 - (\sum \rho)^2}$$

$$B = \frac{(\sum r) (\sum \rho^2) - (\sum \rho \cdot r) (\sum \rho)}{N \cdot \sum \rho^2 - (\sum \rho)^2}$$

II) Equação a ajustar: $r = A \cdot \rho \cdot e^{-B \cdot \rho}$

$$\text{Anamorfose: } \ln r = \ln A + \ln \rho - B \cdot \rho$$

$$S = \sum [\ln r - (\ln A + \ln \rho - B \cdot \rho)]^2$$

Condições de mínimo para S:

$$1) \frac{\partial S}{\partial A} = - \frac{2}{A} (\sum \ln r - N \cdot \ln A - \sum \ln \rho + B \cdot \sum \rho) = 0$$

$$2) \frac{\partial S}{\partial B} = 2 (\sum \rho \cdot \ln r - \ln A \cdot \sum \rho - \sum \rho \cdot \ln \rho + B \cdot \sum \rho^2) = 0$$

Resolvendo o sistema acima para $\ln A$ e B obtem-se:

$$\ln A = \frac{\sum \ln r + \sum \ln \rho + B \cdot \sum \rho}{N} \therefore A = e^{\ln A}$$

$$B = \frac{\sum \rho \cdot \ln r - \sum \rho \cdot \ln \rho + N \sum (\rho \cdot \ln \rho - \rho \cdot \ln r)}{N \cdot \sum \rho^2 - (\sum \rho)^2}$$

III) Equação a ajustar: $r = A \cdot \rho^n \cdot e^{-B \cdot \rho}$

Anamorfose: $\ln r = \ln A + n \cdot \ln \rho - B \cdot \rho$

$$S = \sum [\ln r - (\ln A + n \cdot \ln \rho - B \cdot \rho)]^2$$

Condições de mínimo: $\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial n} = 0$

$$1) \quad \ln A(-N) + B(\sum \rho) + n(-\sum \ln \rho) = -\sum \ln r$$

$$2) \quad \ln A(-\sum \rho) + B(\sum \rho^2) + n(-\sum \rho \cdot \ln \rho) = -\sum \rho \cdot \ln r$$

$$3) \quad \ln A(-\sum \ln \rho) + B(\sum \rho \cdot \ln \rho) + n[-\sum (\ln \rho)^2] = -\sum \ln \rho \cdot \ln r$$

O sistema acima pode ser resolvido por determinantes, aplicando-se o teorema de Cramer, como se fez neste trabalho (resolução para $\ln A$, B e n).

5.8 - O Teste de Qui-Quadrado para as Contagens

De início é bom esclarecer que tradicionalmente o teste de qui-quadrado (χ^2) é realizado para as contagens e não para as taxas correspondentes, para se evitar o cálculo destas no teste quando o tempo de contagem é diferente da unidade. A mesma conduta foi seguida nesta pesquisa. Todavia, qualquer das duas abordagens leva aos mesmos resultados.

Para uma amostra de N elementos, por exemplo N contagens, é definida a variável qui-quadrado (χ^2) como (FUSCO, 1977)¹³:

$$\chi^2_{\emptyset} = \emptyset \cdot \frac{S_n^2}{\sigma_n^2} = \sum_{i=1}^n \frac{(n_i - \bar{n})^2}{\sigma_n^2} \quad (V.4)$$

Tem-se que:

$\emptyset = N-1$ quando, como no caso deste trabalho, não se conhece a média \bar{n} do universo das contagens (sendo N quando se conhece).

É o chamado número de graus de liberdade de χ^2 .

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}{N-1} = \text{estimativa de } \sigma_n^2 \text{ através da amostra}$$

$\sigma_n^2 = (\sqrt{\bar{n}})^2 = \text{variância do universo de valores da série de contagens em questão, considerando-se } \mu_n = \bar{n} \text{ (item 3.4).}$

Para cada situação de ensaio pode-se obter conjuntos de contagens de N elementos. Para cada conjunto de tamanho N, vale dizer para cada $\emptyset = N-1$, percebe-se que há todo um universo de valores de χ^2_{\emptyset} , relativo a um universo correspondente de S_n^2 (ver eq. V.3). Tais universos de valores de χ^2_{\emptyset} são descritos pelas distribuições teóricas de probabilidade de χ^2_{\emptyset} , havendo uma distribuição para cada valor $\emptyset = N-1$, deduzida de maneira adimensional a exemplo da distribuição normal reduzida. As distribuições de χ^2_{\emptyset} não são normais, sendo, portanto, assimétricas em relação à sua média, podendo-se admitir o contrário apenas para as grandes amostras ($N > 30$). Logo, para as pequenas amostras como no caso desta pesquisa, os intervalos de confiança de χ^2_{\emptyset} são também assimétricos em relação à média, que ocorre para $\chi^2_{\emptyset} = \emptyset$.

Assim, tem-se que, com P% de probabilidade, os valores de χ^2_{\emptyset} estão contidos no intervalo:

$$\chi^2_{\emptyset} (P\%)_i \leq \chi^2_{\emptyset} \leq \chi^2_{\emptyset} (P\%)_s \quad (V.5)$$

Alguns limites inferiores (i) e superiores (s) para intervalos com 90% de confiança, relativos a números de graus de liberdade \emptyset que ocorreram neste trabalho (item 5.9.1), são dados na Tab. V.7.

$\emptyset=N-1$	$\chi^2(90\%)_i$	$\chi^2(90\%)_s$
5	1,15	11,1
6	1,64	12,6
13	5,89	22,4

Tab.V.7 - Alguns valores de χ^2 , limites de intervalos de confiança com 90% de probabilidade de ocorrência.Fonte: SPIEGEL(1974)⁴⁹.

Através da eq.V.4 o intervalo da expressão V.5 pode ser reescrito da forma:

$$S_n^2(P\%)_i \leq S_n^2 \leq S_n^2(P\%)_s \quad (V.6)$$

Este é o intervalo de confiança para a variância, que nele ocorre P% de probabilidade. Vê-se que os intervalos das expressões V.5 e V.6 se correspondem biunívocamente através da eq.V.4, encerrando ambos a mesma probabilidade de ocorrência das respectivas variáveis, χ^2_{\emptyset} e S_n^2 . Portanto, estabelecer a probabilidade de ocorrência de valores de χ^2_{\emptyset} é também estabelecer a mesma probabilidade de ocorrência das correspondentes variâncias S_n^2 , ou seja, de amostras com essas variâncias. É exatamente nisto que consiste o teste de χ^2 .

A eq. V.4 revela que valores elevados de χ^2 correspondem a conjuntos com contagens muito dispersas, enquanto valores pequenos se relacionam a conjuntos com contagens muito próximas. Torna-se então necessário estabelecer que intervalo de ocorrência corresponde a uma dispersão das contagens que possa ser aceita como normal, inerente à radioatividade. Intervalos de χ^2 considerados satisfatórios na detecção de radiação são dados por vários autores. JAFFEY (1960)²² tende a estabelecer apenas limites su-

periores, citando como mais comuns aqueles com probabilidade de serem excedidos de 0,10; 0,05 e 0,01. Raciocina o autor que as fontes experimentais de distúrbios provavelmente agem mais no sentido de fazer as contagens se dispersarem, produzindo valores elevados de χ^2 , do que no sentido de agrupá-las, tornando χ^2 pequeno.

Porém, do mesmo modo que a dispersão excessiva de um conjunto de contagens é indesejada uma concordância muito grande também o é, uma vez que os valores de um mesmo conjunto devem sempre apresentar uma flutuação estatística, inerente ao fenômeno da radioatividade. Uma concordância excessiva de taxas de contagem do mesmo conjunto de medidas pode ocorrer devido, por exemplo, a um vício do sistema de contagem (MAFRA,1973)²⁶, ou a se estar registrando pulsos espúrios, não provenientes da detecção da radiação. Daí a preocupação de se adotar um limite inferior no intervalo de confiança de χ^2 , abaixo do qual estariam os valores de χ^2 considerados muito pequenos, correspondentes a conjuntos de medidas com contagens artificialmente próximas.

Portanto, o melhor procedimento consiste em estabelecer intervalos de χ^2 limitados superior e inferiormente, com um limite inferior que possua uma probabilidade de ocorrerem valores abaixo dele igual à probabilidade de ocorrência de valores acima do limite superior, como na tab.V.7. Este procedimento é o sugerido por MAFRA(1973)²⁶, que propõe um intervalo com nível de confiança de 90% que, segundo a autora, é bastante empregado na prática da detecção de radiação. Intervalos assim, constantes da tab.V.7, foram adotados nesta pesquisa (item 5.9).

Para os conjuntos de 6 contagens tomados em cada ensaio da pesquisa (cap.VI), aos quais corresponde portanto $\emptyset=5$, o in-

intervalo de 90% de confiança de χ^2 é dado por (tab.V.7) $1,15 \leq \chi^2 \leq 11,1$. Este intervalo, através da equação V.4, se transforma no seguinte:

$$0,48. \sigma_n \leq S_n \leq 1,49. \sigma_n, \quad (V.7)$$

que é o intervalo de aceitação de S_n , considerando-se que, nele ocorrendo, o desvio padrão real S_n está suficientemente próximo do valor teórico σ_n para ser considerado como representativo da dispersão inerente à radioatividade. Portanto, quando isso acontece S_n e σ_n estão suficientemente próximos para serem representativos um do outro.

Mesmo assim, o intervalo acima admite uma variação considerável de desvio padrão real em relação ao teórico, o que, no entanto, pouco altera o erro relativo em termos práticos, seja ele calculado S_n/\bar{n} ou σ_n/\bar{n} , uma vez que as contagens \bar{n} são geralmente elevadas (como nesta pesquisa) e os desvios padrões S_n ou σ_n são pequenos.

5.9 - Aferição da Estabilidade do Sistema de Contagem

As definições que se seguem, de instabilidade do sistema de medição a curto e longo prazos, foram estabelecidas na intenção de se metodizar o controle da estabilidade dos aparelhos no caso específico deste trabalho, pelo que as mesmas não tem a pretensão de serem de caráter geral.

A instabilidade a curto prazo.

Por definição, a instabilidade do sistema a curto prazo é a que se manifesta em pequeno espaço de tempo, ao causar uma maior flutuação das contagens dos conjuntos de medidas afetados. Esse tipo de instabilidade sempre pode ser percebido através do

teste de χ^2 (qui-quadrado), já que este é passível de aplicação a cada conjunto de medidas que se obtenha. Para cada conjunto é calculado um valor correspondente de χ^2 , que é tão maior quanto mais elevada é a dispersão das medidas. Conforme o item 5.8, geralmente se aceita como normais as série de medidas cujos valores de χ^2 pertençam ao intervalo de confiança com 90% de probabilidade de ocorrência. No entanto, a obtenção ocasional de um valor de χ^2 acima desse intervalo não acusa necessariamente a ocorrência da instabilidade a curto prazo, uma vez que se pode esperar que tal aconteça estatisticamente em 5% das vezes. Para resolver este impasse foi estabelecido que esse tipo de instabilidade só estaria caracterizado se, por pelo menos duas vezes consecutivas, se obtivesse conjuntos de medidas com valores de χ^2 acima do intervalo referido, dado que a probabilidade dessa ocorrência é de 0,25% (= 0,05²). Procedimento análogo, mas agora em relação a valores de χ^2 abaixo do intervalo mencionado, foi adotado para a verificação de um possível vício do sistema de contagem (item 5.8).

A instabilidade a longo prazo.

Pode ocorrer, ainda, a instabilidade a longo prazo do sistema de medição, que se manifesta através de uma elevada dispersão de taxas de contagens médias obtidas nas mesmas condições mas em ocasiões ou dias distintos. De modo a aferir a estabilidade a longo prazo foi adotado um procedimento padrão expedito, qual seja o de tomar conjuntos de contagens de controle. Estes se constituíram em conjuntos de 6 medidas obtidos antes e/ou após os ensaios de cada dia, tomados sempre no c.p. padrão e para uma determinada montagem da sonda (tab.V.8). A estabilidade a longo prazo foi, então, verificada pela aplicação do teste de χ^2 a todas as conta -

gens médias dos conjuntos de controle medidos nas mesmas condições. Essas contagens médias, obtidas em diferentes ocasiões, não deveriam apresentar dispersão excessiva, o que foi julgado por um intervalo de confiança de χ^2 com 90% de probabilidade de ocorrência.

A decisão de realizar os testes de estabilidade a curto e longo prazos se fortaleceu com o fato de que, do lote de detectores ainda novos disponíveis para a pesquisa, dois já haviam sido testados anteriormente e se mostrado com as curvas características anômalas (sem o patamar).

Aferição da estabilidade a curto prazo.

A estabilidade a curto prazo do sistema de medição foi de fato constatada, através, da realização do teste de χ^2 para as contagens de cada conjunto de medidas no decorrer dos ensaios, inclusive para os conjuntos de controle (tab.V.8). Em apenas 3 vezes o valor de χ^2 caiu acima do intervalo de confiança correspondente a 90% de probabilidade. Além disso, o fato se deu esporadicamente, desde que nos conjuntos de contagens dos ensaios seguintes teve-se novamente os valores de χ^2 pertencendo ao referido intervalo, o que descartou a hipótese de instabilidade a curto prazo. Os valores elevados de χ^2 supra citados estão nas tabelas VI.3, VI.4 e VI.11, e encontram-se acima do intervalo de 90% dado por $1,15 \leq \chi^2 \leq 11,1$ (item 5.8), correspondente a uma distribuição teórica de χ^2 para 5 graus de liberdade deste (nas tabelas do cap. VI os ensaios, um por linha, estão na ordem em que foram realizados).

Ainda em relação à estabilidade a curto prazo cabe apontar que se obteve apenas dois conjuntos de contagens com valor de

χ^2 muito pequeno, isto é, abaixo do intervalo de confiança de 90% mencionado acima. Vê-se pelas tabelas VI.4 e VI.11 que os dois valores de χ^2 considerados pequenos foram ocasionais, obtidos isoladamente, não constituindo assim evidência de um vício sistemático do aparato de medição.

Aferição da estabilidade a longo prazo.

A estabilidade a longo prazo foi verificada com a aplicação do teste de χ^2 a todas as taxas de contagem média dos conjuntos de controle obtidos nas mesmas condições. Portanto, vê-se pela tab.V.8 que foram necessários dois testes, devido a que eses conjuntos de contagens, apesar de serem medidos sempre no c.p. padrão, foram obtidos de início com a sonda montada para $l_s = 29$ cm e, depois de determinada a distância ótima fonte-detetor, para $l_s = 25$ cm - o comprimento de blindagem correspondente. Necessitou-se, assim, de um teste de χ^2 para cada condição, aplicado às respectivas contagens médias de controle. Além da tabela V.8, também possuem conjuntos de medidas de controle, como parte dos próprios ensaios nelas apresentados, as tabelas VI.1 e VI.8c no caso da sonda montada para $l_s = 29$ cm e, para $l_s = 25$ cm, as tabelas VI.3, VI.8d VI.10 e VI.11 .

Os conjuntos de controle obtidos com a sonda montada para $l_s = 29$ cm foram um total de 7, com 7 respectivas taxas de contagem médias. Obteve-se para estas um valor de χ^2 igual a 9,35, calculado para $\bar{\nu} = 6$ (item 5.8), portanto dentro do intervalo de confiança de 90% correspondente, igual a $1,64 \leq \chi^2 \leq 12,6$. A conclusão é que durante o tempo de obtenção dos conjuntos de medidas envolvidos a estabilidade a longo prazo dos aparelhos foi satisfatória.

Para $l_g = 25$ cm foram realizadas ao todo 14 conjuntos de medidas de controle, sendo obtidas 14 respectivas taxas de contagem médias. O valor de χ^2 calculado para estas e $\emptyset = 13$ (item 5.9), sendo de 18,63, foi interno ao intervalo de confiança de 90% correspondente: $5,89 \leq \chi^2 \leq 22,4$. Desse modo, e em vista do resultado anterior, conclui-se que o sistema de contagem apresentou durante os ensaios estabilidade a longo prazo satisfatória.

Um procedimento mais adequado para a aferição da estabilidade a longo prazo - não aplicado neste trabalho - seria o de se utilizar o teste de χ^2 tão logo um novo conjunto de controle fosse obtido, aplicando-o a todas as taxas médias de controle disponíveis até então. Desse modo poder-se-ia detetar esse tipo de instabilidade assim que se manifestasse, mandando-se então revisar o sistema de contagem. Essa conduta evitaria que se realizasse ensaios com a estabilidade a longo prazo já deteriorada, o que não teria sido possível com o procedimento adotado.

l_s (cm)	CONTAGENS DE CONTROLE						\bar{r}	S_r	χ^2
	MEDIDAS DE r (cpm) $t = 1 \text{ min}$						(cpm)		
29	1120	1230	1170	1193	1160	1155	1171	37,26	5,93
	1102	1165	1200	1149	1137	1165	1153	32,77	4,66
	1130	1225	1193	1165	1173	1160	1174	32,17	4,41
	1164	1101	1125	1154	1091	1170	1134	33,51	4,95
	1115	1151	1163	1124	1203	1196	1159	36,18	5,65
25	2209	2116	2162	2109	2146	2128	2145	36,91	3,18
	2055	2170	2083	2159	2205	2100	2129	57,95	7,89
	2040	2160	2138	2102	2201	2189	2138	59,92	8,40
	2129	2109	2171	2172	2162	2113	2143	29,11	1,89
	2170	2100	2175	2120	2078	2130	2129	38,26	3,44
	2210	2188	2190	2200	2070	2120	2163	55,55	7,13
	2085	2057	2011	2195	2153	2110	2102	66,19	10,42
	2101	2095	2135	2130	2122	2160	2124	23,78	1,33

Tab.V.8 - Taxas de contagem de concreto obtidas no c.p. padrão.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Introdução

Cada ensaio da pesquisa constituiu-se na obtenção de um conjunto de 6 contagens n , cada uma delas obtida em um tempo de contagem t , logo às mesmas correspondendo 6 taxas de contagem $r=n/t$, que são os valores que de fato interessam. O correspondente valor médio é que foi sempre tomado como a taxa de contagem representativa da situação, sendo portanto o valor utilizado nos gráficos. Estes foram construídos a partir das tabelas que são apresentadas neste capítulo com os resultados dos ensaios, constando um ensaio por linha.

Em qualquer corpo de prova ensaiado a posição de medida da sonda foi sempre a indicada na Fig.V.6, com o aparelho introduzido no tubo de acesso e assentado sobre o espaçador de madeira situado no fundo do tubo.

Nas tabelas das medidas, além das 6 contagens de cada situação de ensaio, constam ainda na mesma linha o valor correspondente de χ^2 (eq.V.4) e o desvio padrão real S das taxas de contagem em questão, calculado para r e r_b pela eq.III.33 e, para r , segundo a eq.III.37. Estão também indicados os tempos de contagem total (t) ou do "background (t_b)", conforme o caso.

Durante a manipulação da sonda radioativa nos ensaios o autor tomou as devidas medidas de proteção contra radiação, brevemente comentadas no apêndice A.

6.2 - Deteminação do Raio de Influência no Concreto

6.2.1 - Introdução

Segundo o item 3.2, pode-se determinar o raio de influência de uma sonda em um meio com uma dada densidade ensaiando-se uma série de corpos de prova cilíndricos do material em questão, com os diâmetros variando de 10 em 10 cm dentro de uma faixa que se estime conter com certa folga o raio de influência. Via de regra a taxa de contagem obtida aumenta com o diâmetro do c.p., estabilizando na prática para diâmetros acima de um certo valor. Traçando-se uma curva "taxa de contagem versus espessura de material ao redor do tubo de acesso" pode-se então determinar o raio de influência, que é a espessura de material correspondente a 95% da taxa de contagem estabilizada. Isto significa que todo material que diste do tubo de acesso mais do que o raio de influência da sonda contribui para a taxa de contagem com no máximo 5%, e que a sua total ausência decresce a taxa do mesmo valor.

6.2.2 - Resultados

6.2.2.1 - O maior Raio de Influência no Concreto

O primeiro ensaio da pesquisa foi o de determinação do maior raio de influência da sonda no concreto, relativo à maior distância fonte-detetor 1 com que o aparelho seria avaliado, igual a 31,5 cm (correspondente ao comprimento de blindagem $l_s = 29$ cm, item 5.4.7). A intenção de assim se proceder foi verificar se o maior raio de influência não ultrapassaria os limites dos corpos de prova de concreto com defeito simulado e dos c.p.'s para a construção das curvas de res -

posta, o que acarretaria os problemas mencionados no item 5.5.1.

Para tanto ensaiou-se a série de 5 corpos de prova de concreto descrita no item 5.5.3.1, com c.p.'s de diâmetro variando de 15 a 55 cm de 10 em 10 cm, moldados com o tubo de acesso padrão, de PVC. As 6 taxas de contagem totais obtidas em cada c.p. e seus valores médios \bar{r} estão na Tab.VI.1, bem como as taxas de contagem líquidas correspondentes \bar{r}_p , calculadas por $\bar{r}_p = \bar{r} - r_b$. O "background" r_b da sonda, relativo a $l_s = 29$ cm, foi medido segundo se explica no item 6.4.1. O diâmetro externo do tubo de acesso padrão (~ 5 cm) resultou para os c.p.'s ensaiados, nos diâmetros de 15, 25, 35, 45 e 55 cm, em espessuras de concreto e_c ao redor do tubo de respectivamente 5, 10, 15, 20 e 25 cm.

Traçou-se então a curva líquida $\bar{r}_p \times e_c$ da Fig.VI.1, constando aí a curva total $\bar{r} \times e_c$ apenas para efeito de comparação.

O maior raio de influência foi determinado evidentemente sobre a curva líquida - "taxa de contagem líquida \bar{r}_p x espessura e_c de concreto ao redor do tubo" - e não sobre a curva total - "taxa de contagem total \bar{r} x espessura e_c de concreto" -, uma vez que a taxa total \bar{r} possui incluída em si a taxa do "background" r_b , que é insensível às variações de diâmetro dos c.p.'s. De conformidade com os conceitos acima estabelecidos o referido raio de influência foi estimado como sendo a espessura de concreto em torno do tubo de acesso correspondente a 95% da taxa de contagem líquida \bar{r}_p estabilizada, de acordo com as setas da Fig.VI.1, tendo-se obtido o valor mais provável de 14,5 cm (mais provável porque correspondente a uma taxa de contagem líquida que é média de uma distribuição normal e que,

portanto, é a taxa mais provável). Tomou-se para a taxa líquida estabilizada a média das duas taxas \bar{r}_p mais elevadas e praticamente iguais (Fig.VI.1 e Tab.VI.1).

Outra série de 5 c.p.'s, descrita no item 5.5.3.1, semelhante à anterior mas provida com o tubo de acesso menor de aço, com dimensões muito próximas das do tubo padrão de PVC, foi ensaiada para se avaliar uma possível influência do tubo de aço - material muito mais denso que o PVC - no raio de influência da sonda. Também aqui utilizou-se a sonda montada para a sua maior distância fonte-detetor l , igual a 31,5 cm ($l_s = 29$ cm). O ensaio desta série de c.p.'s foi realizado da mesma maneira que para a série anterior e seus resultados estão na Tab.VI.2 e Fig.VI.2. Nessa tabela o valor utilizado para o "background", por ser para c.p.'s com tubo de acesso de aço, diferiu um pouco do valor relativo aos c.p.'s com tubo de PVC, conforme explicação no item 6.4.2.

A exemplo do procedimento anterior, construída a Fig.VI.2, a partir da curva líquida $\bar{r}_p \times e_c$ obteve-se para o maior raio de influência da sonda em c.p.'s de concreto com tubo de acesso de aço o valor mais provável de 16 cm. No item seguinte compara-se este resultado com o dos c.p.'s com tubo padrão, de PVC.

6.2.2.2 - O Raio de Influência no Concreto

Após determinada a distância ótima fonte-detetor l (item 6.5), igual a 27,5 cm ($l_s = 25$ cm), partiu-se para a estimativa do raio de influência correspondente, com o qual se teria uma idéia da área ensaiada ao redor do tubo para essa montagem da sonda, preferencialmente a definitiva para utilização. Ensaiaando-se novamente a série de c.p.'s de diâmetros cres

centes e com tubos de acesso padrões obteve-se os resultados da Tab.VI.3. A curva líquida $\bar{r}_p \times e_c$ correspondente (Fig.VI.3) forneceu para 95% da taxa estabilizada (média dos dois maiores valores) um raio de influência da sonda com o valor mais provável de 14,5 cm, que, no item seguinte, é comparado com o resultado obtido com a sonda montada para a maior distância fonte-detetor empregada nos ensaios.

O asterisco que assinala o comprimento de blindagem l_s na Fig.VI.3 e Tab.VI.3 serve apenas para indicar que os ensaios acima descritos foram realizados após o detetor, devido a avarias, ter se apresentado com sua sensibilidade à radiação alterada em relação à original (2ª calibração da sonda, ap.B.2).

6.2.3 - Discussão dos Resultados

6.2.3.1 - Quanto ao Maior Raio de Influência no Concreto

1- Os valores mais prováveis determinados para o maior raio de influência da sonda nas duas séries de c.p.'s de concreto, uma com tubos de PVC e a outra com tubos de aço, foram respectivamente de 14,5 e 16 cm (Fig's.VI.1 e VI.2). À primeira vista tais resultados causaram certa surpresa, por inicialmente se estar imaginando justamente o contrário: se é que se deveria esperar alguma diferença, a expectativa apontava no sentido do raio de influência ser menor nos c.p.'s com tubos de aço, por estes atenuarem mais a radiação através do efeito Compton que os tubos de PVC, tornando-a assim menos energética e, portanto, menos penetrante.

No entanto a comparação desses resultados só tem sentido quando pensada a partir da barra de erro da taxa líquida média \bar{r}_p (e não da taxa líquida r_p), dada por $\bar{r}_p \pm 2\sigma_{r_p}/\sqrt{N}$ segundo a distribuição amostral das médias (FUSCO,1977)¹³, com N=6 por serem conjuntos de 6 contagens. Essa barra de erro encerra um intervalo de confiança de 95%.

A barra de erro acarreta, para cada série de c.p.'s, uma variabilidade correspondente na determinação do maior raio de influência. Assim, para os c.p.'s com tubo padrão de PVC, segundo a Fig.VI.1 pode-se estimar o maior raio de influência no concreto como estando, com 95% de probabilidade, na faixa de aproximadamente 13,5 a 16 cm e, para os c.p.'s com o tubo menor de aço (Fig.VI.2) como pertencendo ao intervalo de cerca de 14,5 a 19 cm. Estes intervalos sim, é que interpretam os ensaios devidamente. Deve-se ainda ter em mente que os mesmos correspondem à montagem da sonda para a maior distância fonte-detetor l , de 31,5 cm ($l_s = 29$ cm).

- 2- Haja visto os intervalos acima referidos e, ainda, que não é lógico aceitar que os tubos de aço tenham contribuído para aumentar o raio de influência, pode-se adotar para o maior raio de influência da sonda no concreto o valor de 14 cm, com boa segurança de não se estar errando para mais.

6.2.3.2 - Quanto ao Raio de Influência no Concreto

- 1- De acordo com raciocínios semelhantes aos de (1) acima, o raio de influência da sonda no concreto, correspondente ao aparelho montado para a distância ótima fonte-detetor ($l = 27,5$ cm), pode ser estimado como estando, com 95% de confiança, no intervalo de cerca de 13,5 a 17 cm. Portanto, em presença dos intervalos anteriores; não há evidências de que o raio de influên

cia no concreto tenha decrescido quando a distância fonte-de-
tector 1 foi diminuída de 31,5 para 27,5 cm. Isso pode ser in-
dicativo de que para uma distância fonte-detector elevada (aci-
ma de 20 cm segundo PLATA, 1972)³⁷, incrementos até mesmo ra-
zoáveis na mesma não mais consigam elevar de modo significa-
tivo o raio de influência, ao menos no concreto e em termos
práticos.

Desse modo, para a sonda em questão montada com a sua distân-
cia ótima fonte-detector, igual a 27,5 cm ($l_s = 25$ cm) - a
mesma que foi utilizada nos ensaios dos c.p.'s com defeitos
simulados -, é razoável se admitir um raio de influência no
concreto de 14cm.

6.2.3.3 - Quanto aos Tubos de PVC e Aço

- 1- O peso por metro do tubo padrão de PVC utilizado é mais de 4
vezes menor que o do tubo menor de aço, que lhe corresponde
(item 5.5.5). A leveza dos tubos de PVC propiciaria maior fa-
cilidade no manuseio e instalação na obra, quando do posicio-
namento e fixação dos tubos na armação da estaca.
- 2- Os tubos de PVC apresentaram à época da aquisição um custo
de cerca de metade daquele dos tubos de aço.
- 3- Os tubos de PVC rígido são bastante utilizados em instalações
prediais de água fria, razão pela qual podem ser encontrados
com facilidade em quase todo o país, o que não ocorre com os
tubos de aço.
- 4- As medidas tais como o diâmetro interno e a espessura das pa-
redes variam bem menos nos tubos de PVC em comparação com os
de aço, o que minimiza alterações nas medidas devidas a essas
variações, principalmente em sondas colimadas.
- 5- Sendo o PVC um material pouco denso ($\rho=1,4$) seus tubos são

bem mais permeáveis à radiação que aqueles de aço ($\rho=7,8$), permitindo assim que muito mais raios cheguem ao concreto e dele retornem ao detetor na unidade de tempo, o que significa taxas de contagem bem mais elevadas. Nos c.p.'s do concreto as taxas de contagem \bar{r}_p obtidas para aqueles com o tubo padrão de PVC foram mais do dobro daquelas medidas nos c.p.'s correspondentes com o tubo menor de aço (Tab.'s VI.1 e VI.2). Tal fato significa que o tubo de PVC permite que se reduza o tempo de medida à metade para se obter os mesmos resultados, o que sem dúvida agilizaria a verificação da estaca na obra.

ENSAIO DOS 5 C.P.'s DE CONCRETO COM Ø VARIANDO DE 15 A 55 cm, DE 10 EM 10 cm,
E TUBO DE ACESSO PADRÃO.

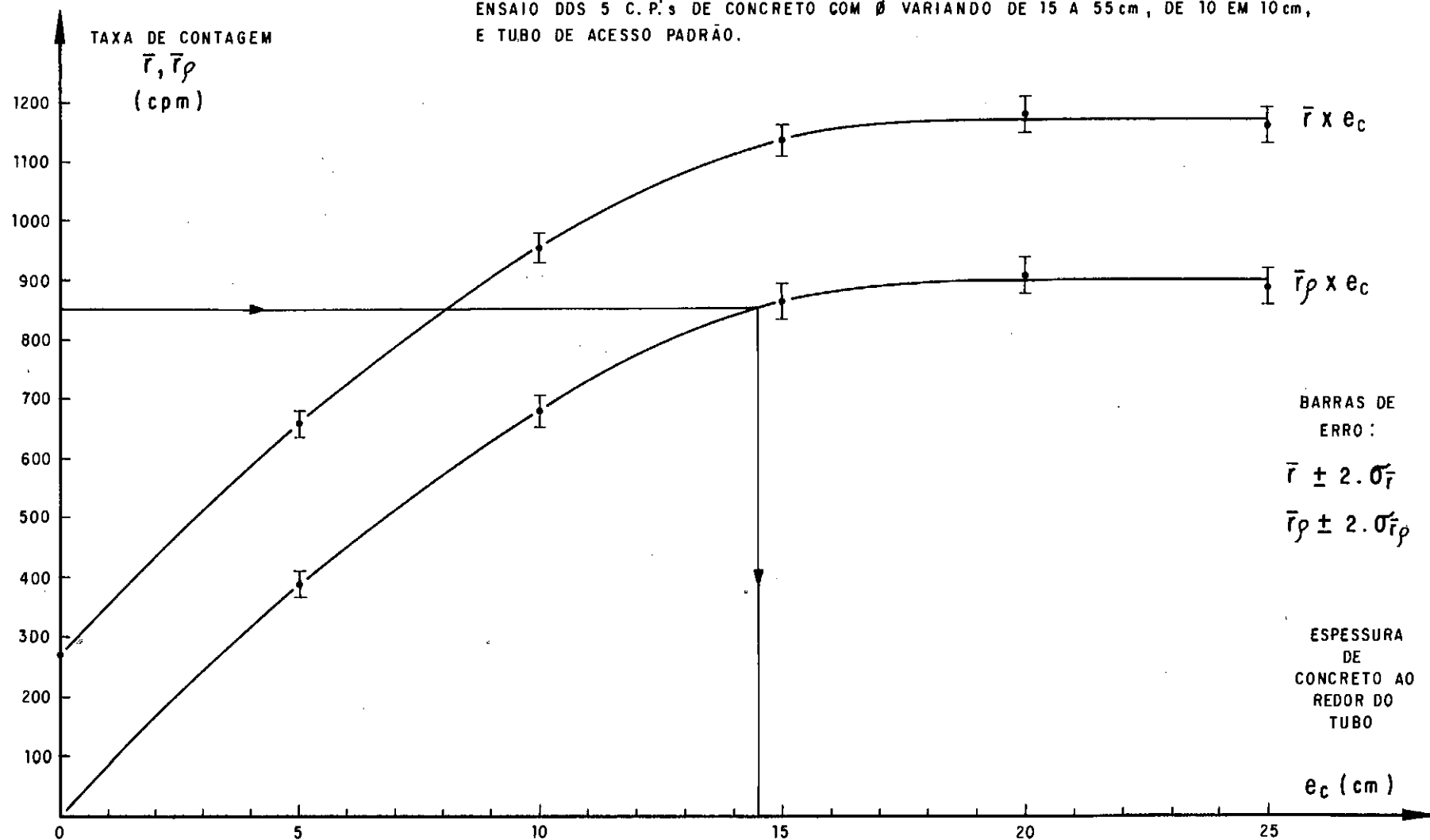


Fig. VI.1 - Determinação da maior raio de influência da sonda no concreto (para $\ell_s = 29$ cm),
através da curva líquida $\bar{r}_\rho \times e_c$.

ENSAIO DDS 5 C.P.'s DE CONCRETO COM \varnothing VARIANDO DE 15 A 55 cm, DE 10 EM 10 cm,
E TUBO DE ACESSO MENOR DE AÇO.

BARRAS DE ERRO: $r_p \pm 2\sigma_r$ e $r_p \pm 2\sigma_{r_p}$

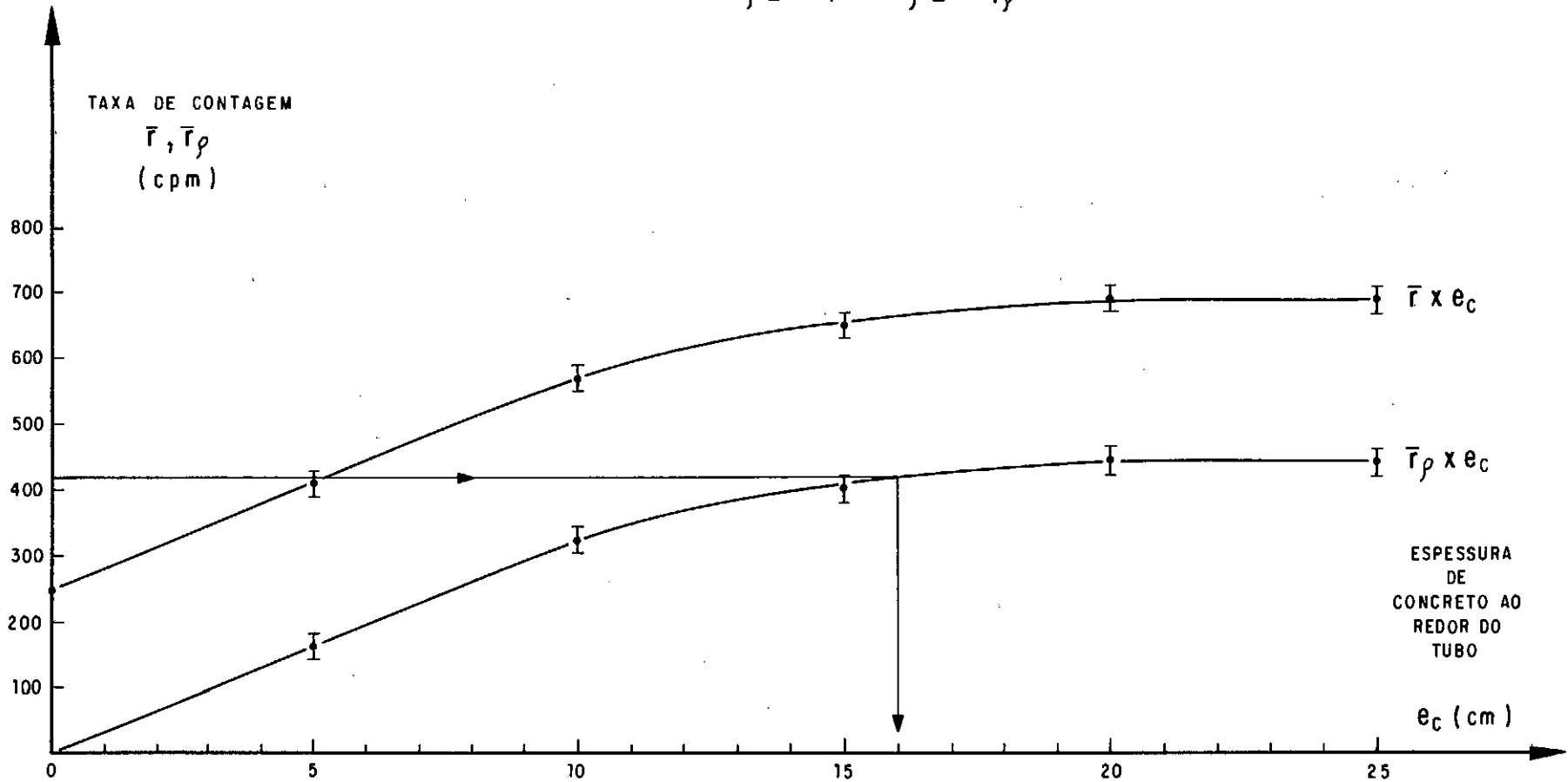


Fig. VI.2 - Determinação do maior raio de influência do sonda no concreto (para $l_s = 29$ cm), através da curva líquido $\bar{r}_p \times e_c$.

Ø C.P. (cm)	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t=1 min	$l_s=29\text{cm}$				$\bar{r}_b=271\text{ cpm}$	(cpm)			(cpm)	
15	642	653	642	709	625	675	658	30,05	6,86	387	31,55
25	946	969	990	974	904	944	954	30,28	4,80	638	31,77
35	1100	1138	1110	1134	1217	1122	1137	41,79	7,68	866	42,88
45	1204	1212	1163	1211	1103	1180	1179	41,88	7,44	908	42,97
55	1135	1163	1199	1126	1179	1163	1161	27,12	3,17	890	28,77

Tab.VI.1 - Determinação do maior raio de influência da sonda no concreto (para $l_s=29\text{cm}$): taxas de contagem obtidas nos c.p.'s de concreto com tubo de acesso padrão, de PVC.

Ø C.P. (cm)	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t= 1 min		$l_s= 29\text{cm}$		$\bar{r}_b=247\text{ com}$		(cpm)			(cpm)	
15	413	425	384	426	415	396	410	16,65	3,38	163	-
25	552	600	578	545	575	568	570	19,70	3,41	323	-
35	622	682	652	613	650	680	650	28,57	6,28	403	-
45	691	706	751	640	662	705	692	38,60	10,77	445	-
55	673	721	699	639	714	675	687	30,57	6,80	440	-

Tab.VI.2 - Determinação do maior raio de influência da sonda no concreto (para $l_s=29\text{cm}$): taxas de contagem obtidas nos c.p.'s de concreto com tubo de acesso menor de aço.

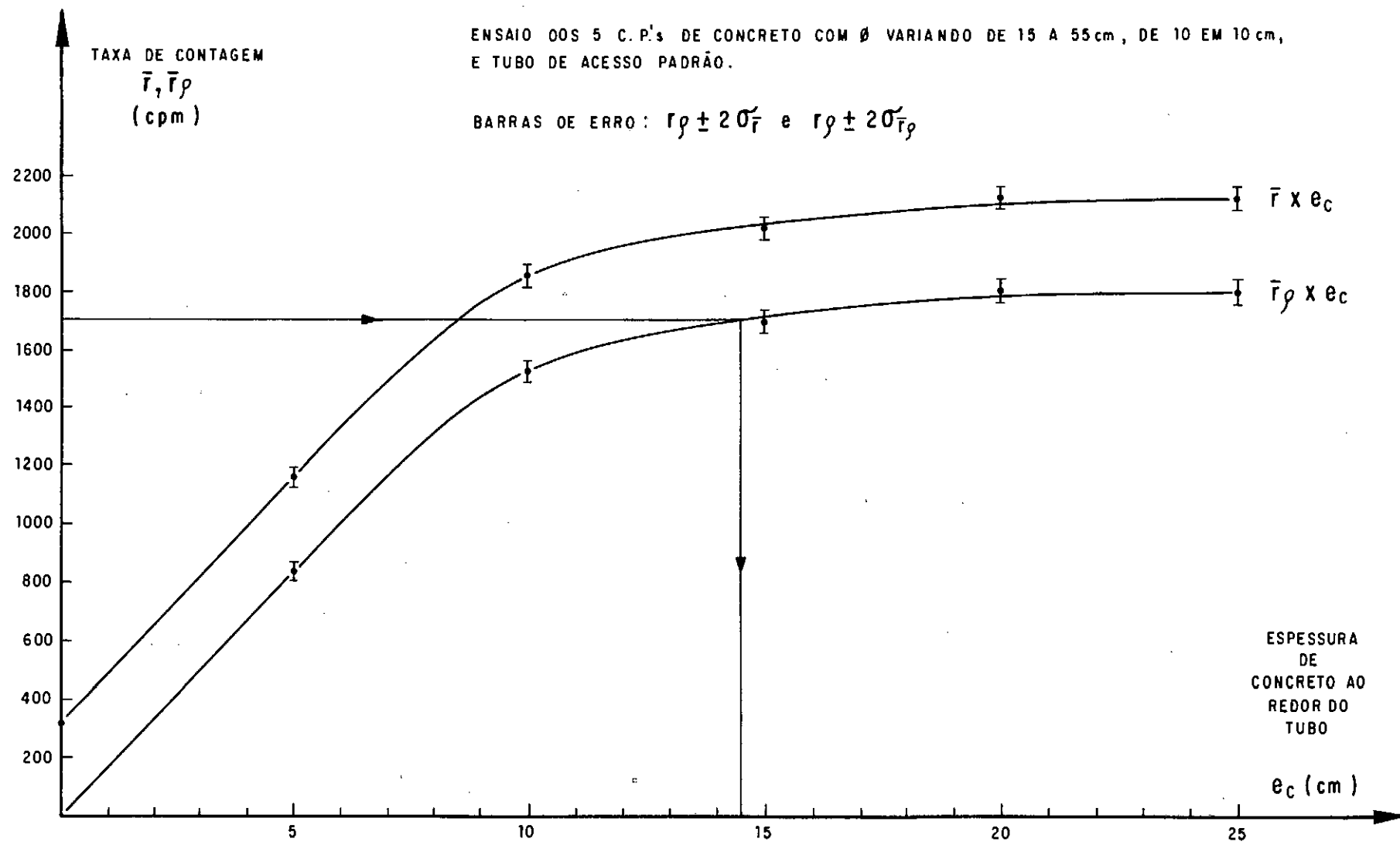


Fig. VI.3 - Determinação da raio de influência da sonda no concreto (para $l_s = 25 \text{ cm}^*$), através da curva líquida $\bar{r}_p \times e_c$.

Ø C.P. (cm)	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t = 1 min		$l_s=25\text{cm}^*$		$\bar{r}_b=320 \text{ com}$		(cpm)			(cpm)	
15	1185	1147	1140	1177	1207	1155	1168	25,63	2,81	848	31,42
25	1955	1770	1896	1846	1811	1827	1851	65,73	11,67	1531	68,20
35	1985	2040	2052	2035	2023	1992	2017	35,27	3,08	1697	39,68
45	2127	2105	2182	2109	2038	2158	2120	49,81	5,85	1800	53,02
55	2059	2177	2093	2165	2100	2095	2115	46,02	5,01	1795	49,48

Tab.VI.3 - Taxas de contagem obtidas nos C.P.'s com tubo padrão de PVC, para a determinação do raio de influência da sonda montada com $l_s = 25 \text{ cm}^*$. O asterisco indica que os ensaios foram realizados após o detetor ter apresentado uma alteração na sua sensibilidade à radiação, devido a avarias (apêndice B.2).

6.3 - Influência do Piso no "Background" da Sonda e nas Medidas em C.P.'s.

6.3.1 - Influência do Piso no "Background" da Sonda

O "background" ou contagem de fundo de uma sonda radioativa é a taxa de contagem proveniente da radiação do meio ambiente e daquela que, oriunda da fonte, consegue atravessar a blindagem. É, portanto, um valor que independe do material ensaiado. Deve ser medido com a sonda suficientemente afastada de qualquer material que possa refletir a radiação da fonte de volta ao detetor. GARDNER e ROBERTS (1967)¹⁶ recomendam que para medir o "background" o aparelho radioativo deve ser suspenso cerca de 150 cm acima do piso. Resolveu-se verificar essa sugestão medindo a taxa de contagem de fundo r_b com a sonda montada para $l_s = 29\text{cm}$ e tendo seu extremo inferior a várias distâncias do piso, conforme a Tab.VI.4. Posicionou-se a sonda acima de um suporte de madeira, como se, da situação de medida em um corpo de prova, se tivesse abstraído o material ao redor do tubo de acesso (Fig.VI.4). Realizou-se medidas de r_b com a sonda dentro e fora do tubo, para verificar uma possível influência deste. As taxas médias \bar{r}_b obtidas foram então plotadas em dois gráficos, um para cada situação (Fig.VI.4), notando-se com a redução das taxas da curva (1) para a (2) que o tubo padrão utilizado, de PVC, exerceu uma certa blindagem da radiação.

O principal, no entanto, foi a constatação por esses ensaios de que a medida do background da sonda é, de fato, grandemente influenciada pela proximidade do piso, que a incrementa falsamente mesmo que dele o aparelho diste até 1,30 m, segundo a curva (1) da Fig.VI.4. Nesta curva observa-se alguma dispersão das taxas médias em torno do gráfico, o que pode ser

atribuído à presença, a 1,80 m do local de ensaio, de uma estrutura vazada a meia altura, da qual a sonda se aproximava ao ser içada e que também estaria refletindo a radiação, embora menos que o piso e de maneira desigual.

A influência do piso no "background" da sonda, que ficou patente com esses ensaios, determinou as providências descritas no item seguinte para a medida do mesmo (item 6.4).

6.3.2 - Influência do Piso nas Medidas em c.p.'s

Os resultados relatados acima provocaram a suspeita de que as taxas de contagem obtidas nos c.p.'s de $\varnothing 15$ e $\varnothing 25$ cm de diâmetro, já ensaiados (item 6.2.2), estivessem acrescidas por radiação refletida no piso, devido às espessuras de concreto ao redor do tubo desses c.p.'s talvez serem insuficientes para blindar tal radiação, que então estaria atingindo o detetor. Para esclarecer tais dúvidas esses c.p.'s foram ensaiados suspendendo-os sobre suportes de madeira (Fig.V.15a) a várias distâncias do piso, correspondentes a nenhum, 1, 2, 3 e 4 suportes sobrepostos, conforme às Tab.'s VI.5a e VI.5b. As taxas líquidas médias $\bar{r}_p = \bar{r} - \bar{r}_b$ dessas tabelas, obtidas em cada c.p. com a sonda montada para $l_s = 29$ cm, foram então plotadas contra a distância do fundo do corpo de prova ao piso (Fig.VI.5). Notou-se que, enquanto as medidas no c.p. $\varnothing 25$ cm praticamente não se alteraram com a maior ou menor proximidade do piso (o que assegurava que o mesmo ocorrera para os corpos de prova maiores), aconteceu o contrário para o c.p. $\varnothing 15$ cm, cuja taxa líquida \bar{r}_p só se estabilizou para uma distância ao chão a partir de 37,5 cm, relativa ao corpo de prova sobre 3 suportes superpostos. Isso mostrava que a partir dessa distância a radiação refletida no piso já não mais conseguia atingir a sonda dentro do c.p. $\varnothing 15$ cm, sendo a taxa \bar{r}_p

assim obtida a correta, relativa apenas à radiação refletida pelo material do corpo de prova. Esta taxa e a taxa total correspondente \bar{r} foram as utilizadas nas curvas da Fig.VI.1 e Tab.VI.1 para o c.p. Ø 15 cm. O corpo de prova de concreto Ø15 cm e tubo de aceso menor de aço, cujo ensaio está mostrado na Tab.VI.2, também foi medido sobre 3 suportes superpostos.

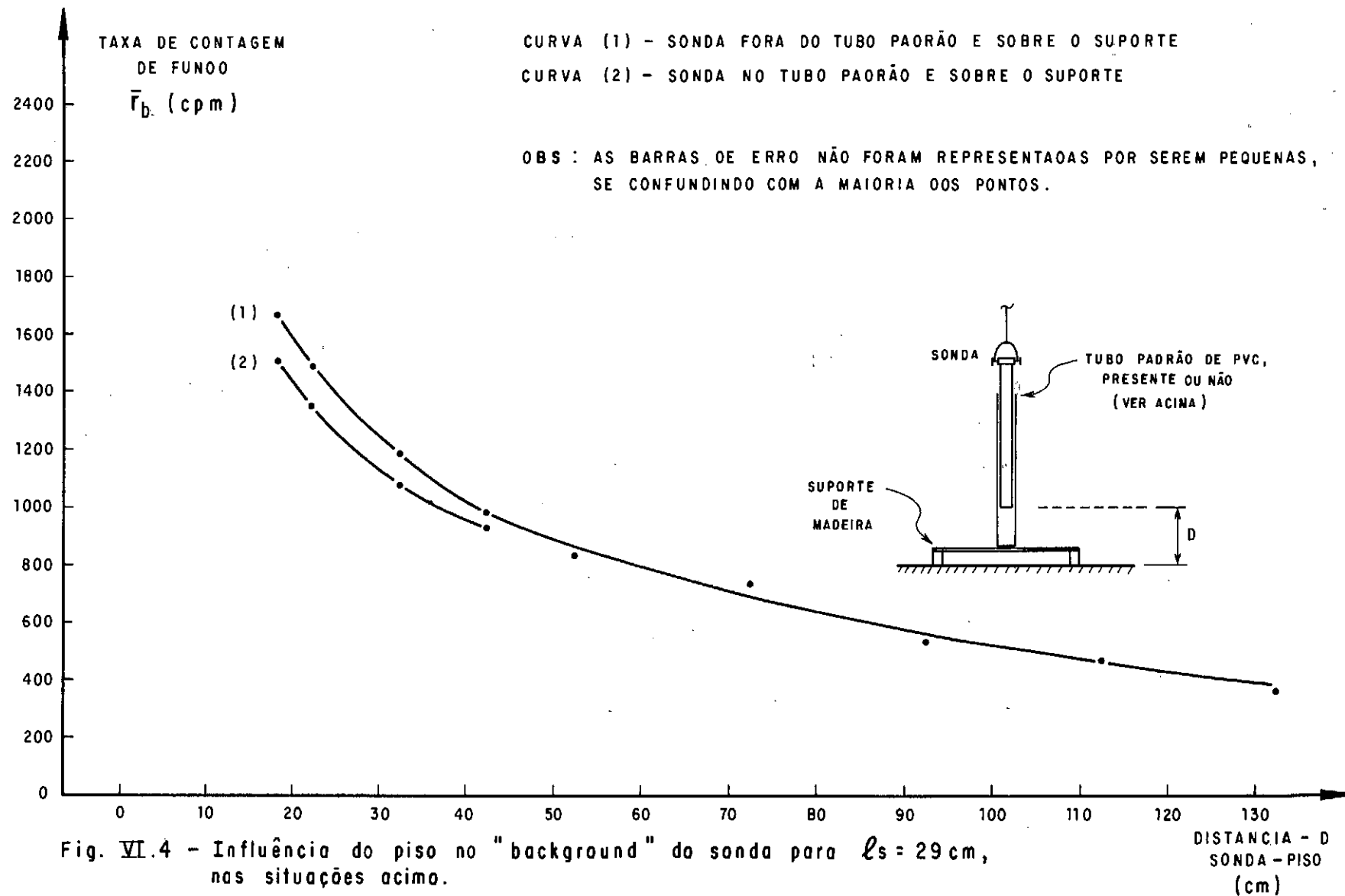


Fig. VI.4 - Influência do piso no "background" da sonda para $\ell_s = 29$ cm, nas situações acima.

DISTÂNCIA D SONDA - PISO (cm)		MEDIDAS DE r_b (cpm)						\bar{r}_b	S_{r_b}	χ^2
		$t_b = 1 \text{ min}$			$l_s = 29 \text{ cm}$			(cpm)		
SONDA NO TUBO DE PVC	18,5	1549	1425	1461	1542	1583	1482	1507	60,38	12,10
	22,5	1314	1387	1310	1373	1371	1370	1354	33,26	4,08
	32,5	1126	1027	1121	1065	1073	1071	1080	37,31	6,44
	42,5	900	942	989	904	872	967	929	44,56	10,69
SONDA FORA DO TUBO	18,5	1656	1674	1674	1625	1708	1699	1673	29,98	2,69
	22,5	1430	1490	1568	1514	1472	1456	1488	48,42	7,88
	32,5	1223	1211	1186	1148	1133	1226	1188	39,56	6,59
	42,5	982	994	967	987	993	971	982	11,27	0,65
	52,5	837	844	809	829	858	840	836	16,39	1,61
	72,5	701	744	742	709	760	720	729	22,89	3,59
	92,5	536	504	547	545	525	511	528	17,82	3,01
	112,5	469	456	507	452	463	493	473	21,91	5,08
	132,5	388	369	358	353	323	376	361	22,52	7,02

Tab.VI.4 - Influência do piso no "backhround" da sonda para $l_s = 29 \text{ cm}$, com a sonda sobre o suporte, dentro e fora do tubo padrão (Fig.VI.4).

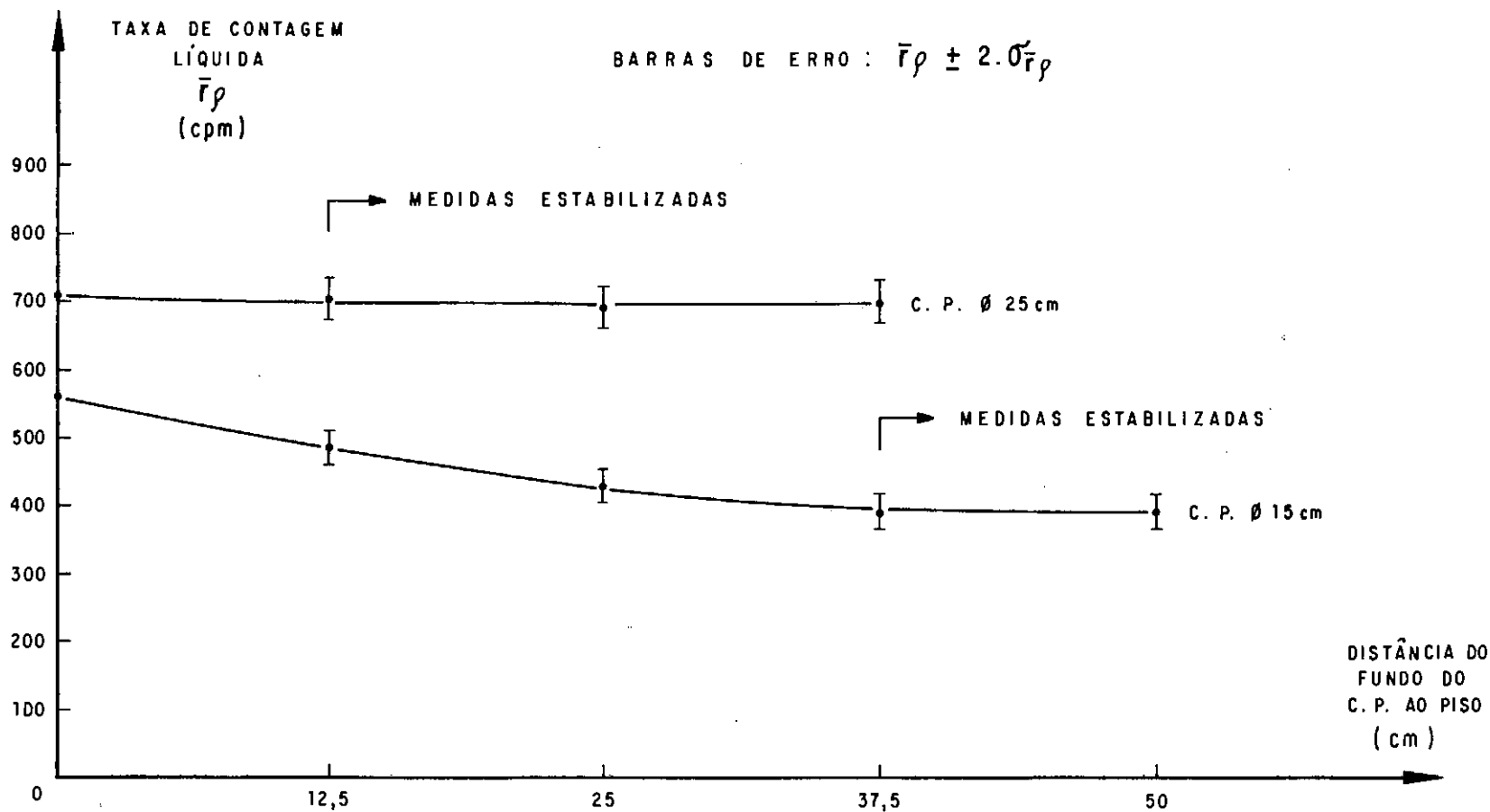


Fig. VI.5 - Taxas de contagem líquidas obtidas nos c.p.'s de concreto Ø 15 e 25 cm, com tubo padrão de PVC, em função da distância do fundo dos c.p.'s ao piso. Ensaio com sonda montado para $\ell_s = 29$ cm.

DISTÂNCIA C.P. - PISO(cm)	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{rp}
	t=1 min	$l_s=29$ cm		$\bar{r}_b=271$ cpm			(cpm)			(cpm)	
0	860	823	844	827	813	811	830	18,99	2,17	559	21,28
12,5 (1 sup.)	796	774	754	725	747	739	756	25,53	4,31	485	27,28
25 (2 sup.)	698	708	686	730	664	699	698	22,02	3,47	427	24,02
37,5 (3 sup.)	642	653	642	709	625	675	658	30,05	6,86	387	31,55
50 (4 sup.)	636	675	669	678	637	681	663	20,66	3,22	392	22,78

Tab.VI.5a - Ensaios para avaliação da influência do piso nas taxas de contagem tomadas no c.p.
de concreto Ø 15 cm, com tubo de acesso padrão, de PVC.

DISTÂNCIA C.P. - PISO(cm)	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t=1 min	$l_s=29$ cm		$\bar{r}_b=271$ cpm		(cpm)		(cpm)			
0	1001	994	977	998	932	981	980	25,59	3,34	709	27,33
12,5 (1 sup.)	990	953	947	969	1006	989	976	23,17	2,75	705	25,08
25 (2 sup.)	996	943	945	974	967	962	964	19,69	2,01	693	21,91
37,5 (3 sup.)	973	993	939	975	977	958	969	18,51	1,77	698	20,85

Tab.VI.5b - Ensaios para avaliação da influência do piso nas taxas de contagem tomadas no c.p.
de concreto Ø 25 cm, com tubo de acesso padrão, de PVC.

6.4 - A Medida do "Background" da Sonda e do Ambiente

6.4.1 - O "Background" da Sonda (BGS)

Tendo em vista os resultados do item anterior, que na medida do BGS mostraram a detecção de radiação da fonte refletida pelo piso, procurou-se afastar esse efeito indesejável blindando lateralmente a emissão com tijolos de chumbo. As duas blindagens utilizadas estão na Fig.VI.7, com as mesmas envolvendo lateralmente o tubo de acesso padrão e a sonda nele introduzida, na tentativa de evitar que a radiação escapasse radialmente da fonte. Tomou-se então, para a blindagem tipo I (Fig.VI.7a), 6 medidas do "background" r_b com cada comprimento de blindagem l_s (Tab. VI.6), plotando-se as taxas médias \bar{r}_b contra l_s para obter-se a curva (1) da Fig.VI.6. O tempo de medida t_b foi de 1 min. Obteve-se taxas de contagem ainda mais elevadas do que na situação do item anterior, sem a blindagem. Suspeitou-se então de que a radiação estivesse agora se refletindo na própria blindagem, o que foi confirmado ao se medir o "background" com a sonda montada para $l_s = 29$ cm e introduzida na blindagem II, Fig.VI.7a. Os tijolos de chumbo superiores, agora de maior altura, estariam sendo suficientes para absorver grande parte da radiação refletida na sua porção inferior, junto à fonte, diminuindo sensivelmente a taxa de contagem \bar{r}_b em relação à obtida com a blindagem I e mesmo l_s (ver Tab.VI.6). Com a blindagem II o "background" foi medido apenas para $l_s = 29$ cm, obtendo-se 6 contagens cuja média \bar{r}_b foi plotada na Fig.VI.6 como o ponto (3). Tais ensaios mostraram que é difícil se obter medidas confiáveis do background com uma blindagem lateral da fonte.

Resolveu-se então medir o BGS com a sonda isolada,

isto é, suficientemente afastada de qualquer material que pudes-
se refletir a radiação da fonte. Para tanto a sonda foi suspensa
com seu extremo inferior distando ~ 3,5 m do piso e do teto e, la-
teralmente, afastada pelo menos 7,3 m de qualquer objeto. Para
cada comprimento de blindagem l_s foram feitas 6 contagens em tem-
pos t_b de 2 min. (Tab.VI.6), com as respectivas médias \bar{r}_b sendo
usadas para traçar a curva (2), Fig.VI.6. Para comparação mediu-
se também o "background" do ambiente (BGA), que consta da mesma
tabela, com medidas feitas para um tempo $t_b = 2$ min. e estando a
sonda sem a fonte.

Os valores \bar{r}_b do "background" obtidos para cada l_s
com a sonda isolada, Tab.VI.6, é que foram os adotados para as
respectivas montagens do aparelho nos demais ensaios da pesquisa.
A Fig.VI.6 permite a comparação do BGS obtido nas várias situa-
ções de ensaio acima relatadas. Conclui-se que a utilização de
blindagens laterais da fonte para a medida do BGS pode levar a
resultados absurdos não sendo, portanto, uma conduta adequada.

Após determinada a distância ótima fonte-detetor (item 6.5),
relativa a $l_s = 25$ cm, o detetor se danificou (ap.B.2),
alterando sua sensibilidade à radiação. Teve-se então de obter
novamente o BGS para esse comprimento de blindagem, com a sonda
isolada, sendo seus valores apresentados na Tab.VI.7. Nesta, o
asterisco no l_s indica a nova situação do detetor, que resultou
numa 2ª calibração da sonda. Mediu-se a taxa de contagem do BGS
para um tempo $t_b = 2$ min., com a sonda dentro do tubo de PVC pa-
drão e fora dele. Os resultados foram praticamente iguais (Tab.VI.
7). O valor do BGS de 320 cpm foi o adotado como \bar{r}_b nos ensaios
realizados com a sonda montada para $l_s = 25$ cm e o detetor já al-
terado, a saber os ensaios dos itens 6.2.2.2; 6.5.2.1 (2ª curva

de calibração); 6.6 e 6.7. Observou-se um aumento razoável no BGS em relação ao valor original, este de 282 cpm (obtido para $l_s=25$ cm e a sonda isolada, Tab.VI.6).

6.4.2 - O "Background" do Ambiente (BGA)

O BGA é a parcela do BGS devida à radiação do meio ambiente. É, portanto, medido com a sonda sem a fonte e montada para qualquer comprimento de blindagem. Antes da avaria no detector o BGA foi medido com a sonda fora dos c.p.'s mas introduzida tanto no tubo de PVC padrão como no tubo menor de aço. Obteve-se ainda o BGA fora desses tubos, para avaliar a influência dos mesmos nas medidas. As 6 taxas do BGA dessas 3 situações, tomadas para um tempo $t_b = 2$ min., bem com suas médias \bar{r}_b , estão na Tab. VI.7(1ª cal.). Os valores \bar{r}_b mostram que o tubo de PVC padrão não influenciou nos resultados. Porém o mesmo não ocorreu no caso do tubo menor de aço, que, blindando significativamente a radiação do ambiente, reduziu a taxa \bar{r}_b do BGA de 180 para 156cpm.

Com este resultado, foi calculada a taxa \bar{r}_b do BGS nos c.p.'s com o tubo de acesso menor de aço (item 6.2.2.1) - relativa a $l_s = 29$ cm -, tomada como a soma da radiação direta através desta blindagem, igual à diferença $271 - 180$ cpm, com o BGA de 156 cpm. Resultou um $\bar{r}_b = 247$ cpm, o valor empregado na Tab.VI. 2 para o cálculo das taxas líquidas \bar{r}_p obtidas nos vários c.p.'s com o tubo menor de aço.

Após a avaria no detector mediu-se novamente a taxa \bar{r}_b do BGA para comparação, cujo valor consta da Tab.VI.7 (2ª cal.). Notou-se, a exemplo do que ocorreu com o BGS (item anterior), um aumento significativo no BGA, de 180 para 225 cpm.

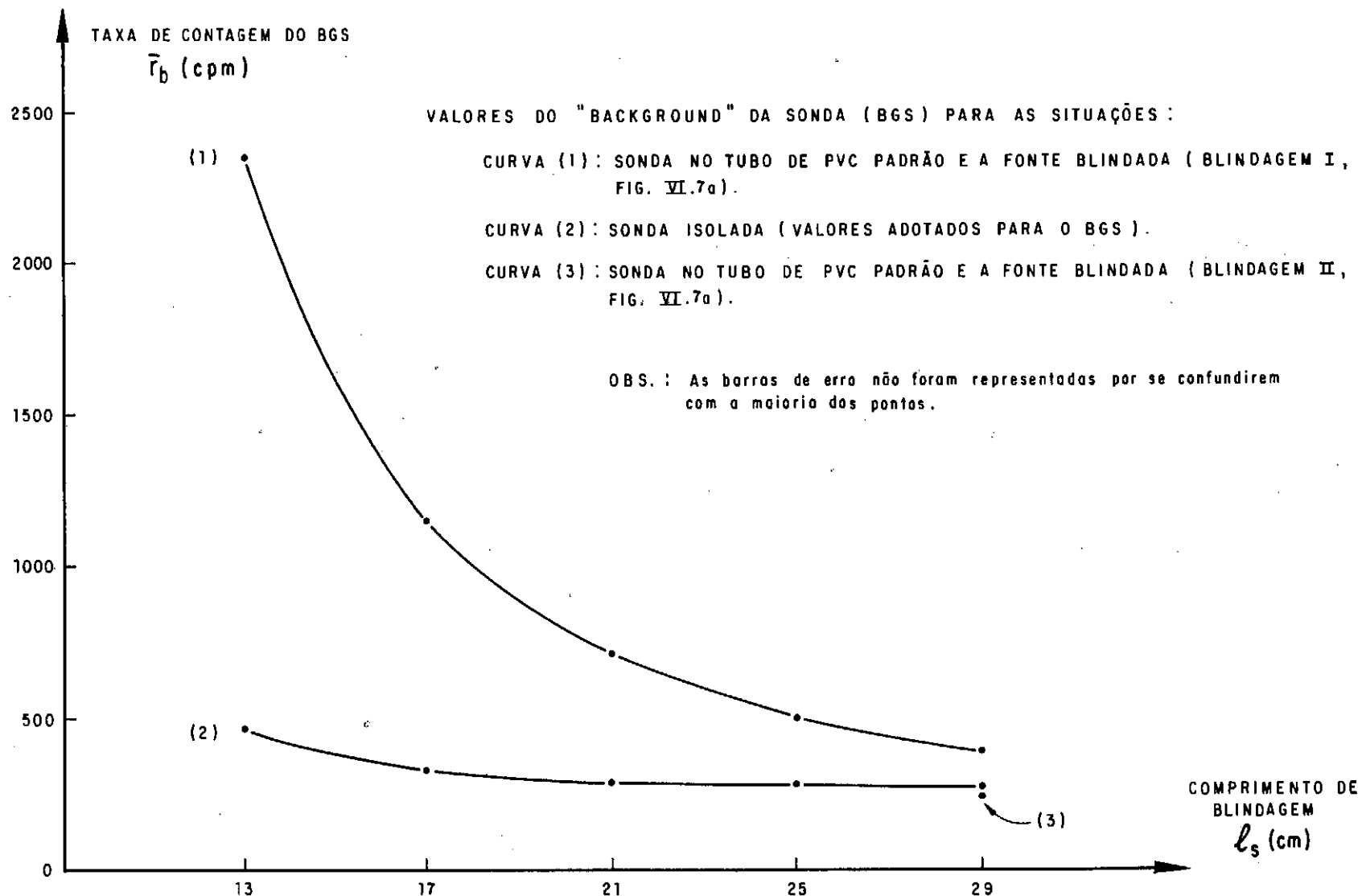
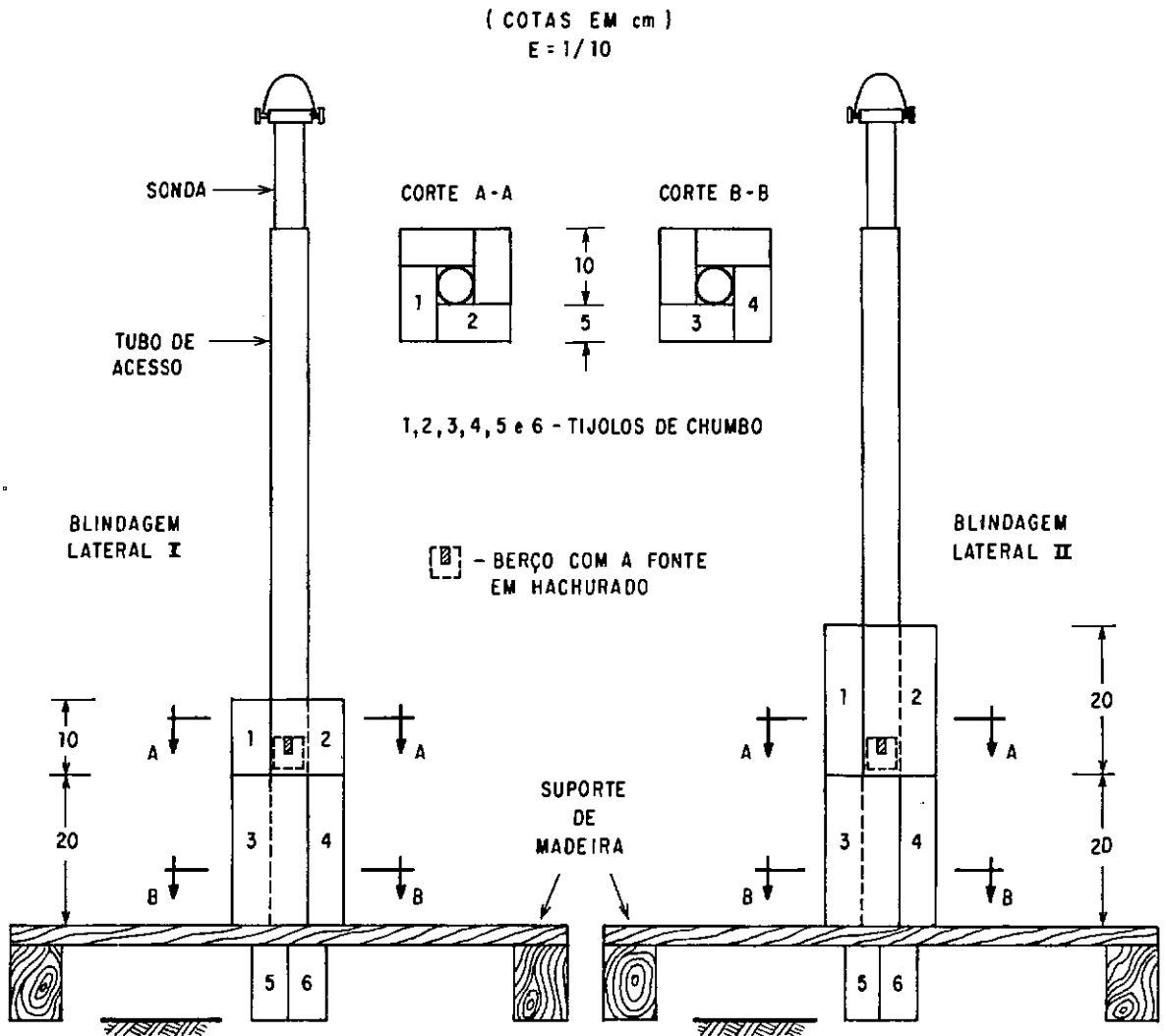


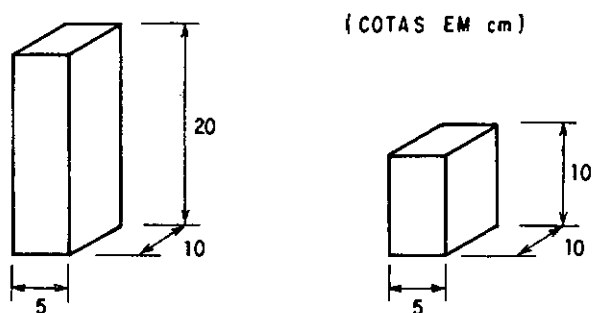
Fig. VI.6 - "Background" da sonda medido nos situações acima para os vários l_s 's.

BLINDAGEM DA FONTE	MEDIDAS DE r_b (cpm)							\bar{r}_b	s_{r_b}	χ^2
								(cpm)		
TIPO I, Fig.VI.7a ($t_b =$ 1 min)	13	2 428	2 327	2 331	2 322	2 314	2 374	2 349	43,88	4 ,10
	17	1208	1150	1132	1176	1140	1144	1158	28,58	3,53
	21	679	719	725	696	724	740	714	22,23	3,46
	25	520	492	472	521	519	502	504	19,70	3,85
	29	378	406	385	383	399	394	391	10,65	1,45
TIPO II ($t_b=1min$)	29	232	258	247	222	247	254	243	13,71	3,87
FONTE SEM BLINDAGEM, SONDA ISOLADA ($t_b=2min$)	13	474,5	479,5	467,5	467	473	432	466	17,10	6,28
	17	340,5	326	310	330,5	627,5	342,5	330	11,70	4,15
	21	295,5	305	286	264,5	281	282	286	13,81	6,68
	25	279,5	298	298,5	271	268,5	277,5	282	13,10	6,08
	29	278	283,5	262	258,5	268,5	274,5	271	9,60	3,40
MEDIDA DO BGA, I_s QUALQUER		174,5	185	170,5	177	188	183,5	180	6,79	2,56

Tab.VI.6 - Medidas do "background" da sonda (BGS) com a fonte blindada lateralmente e sem blindagem (sonda isolada), estes últimos os valores adotados. Medida do "background" do ambiente (BGA), com a sonda sem a fonte (valor adotado).



(a) - TIPOS E DISPOSIÇÃO DA BLINDAGEM LATERAL DA FONTE COM TIJOLOS DE CHUMBO.



(b) - TIJOLOS DE CHUMBO UTILIZADOS NA BLINDAGEM LATERAL DA FONTE.

l_s (cm)	MEDIDA / SITUAÇÃO DA SONDA	MEDIDAS DE r_b (c.p.m.) $t_b = 2 \text{ min}$						\bar{r}_b	S_{r_b}	χ^2
								(c.p.m.)		
— (1ª cal.)	BGA/FORA DOS TUBOS	181,5	159,5	167	188	190	188	179	12,76	9,09
	BGA/NO TUBO PVC PADRÃO	167	165,5	180,5	197	192,5	180	180	12,84	9,15
	BGA/NO TUBO MENOR DO AÇO	160,5	159	158,5	164,5	146	150	156	6,97	3,11
25* (2ª cal.)	BGS/NO TUBO PVC PADRÃO	330	350	324	301,5	311	305,5	320	18,16	10,31
	BGS/FORA DO TUBO	334	305	306	315	344	347	325	18,90	11,00
— (2ª cal.)	BGA/FORA DO TUBO	237	219,5	218	233	237,5	205,5	225	12,84	7,32

Tab.VI.7 - Medidas do "background" do ambiente (BGA), com a sonda na 1ª calibração e em várias situações. Medidas do "background" da sonda (BGS) e do BGA, com a sonda na 2ª calibração (BGS medido com a sonda isolada).

6.5 - Obtenção das Curvas de Resposta e da Curva de Calibração

6.5.1 - Introdução

As curvas de resposta de uma sonda nuclear, uma para cada distância fonte-detetor, configuram as relações taxa de contagem versus densidade. Portanto para obtê-las torna-se necessário ensaiar, com a sonda montada para cada uma de várias distâncias fonte-detetor, alguns materiais cobrindo uma gama adequada de densidades. Por exemplo, no presente caso, ensaiou-se materiais na faixa de densidades daquela do concreto íntegro à da água. Posteriormente, segundo certos critérios como os abaixo descritos, determina-se a distância ótima fonte-detetor (DOFD), cuja curva de resposta correspondente passa a ser a curva de calibração da sonda. Desde então, montada para essa distância, a sonda torna-se pronta para utilização. Todo esse processo é o que se entende por calibração do aparelho.

A DOFD deve ser uma distância fonte-detetor que leve a sonda a reunir simultaneamente duas condições:

- 1- Possua uma curva de calibração cujos erros na densidade sejam suficientemente pequenos na faixa de densidades que se pretende avaliar.
- 2- Apresente a maior distância fonte-detetor possível e que seja conciliável com a condição precedente. Este requisito visa a garantir, através de um maior raio de influência, que a área ensaiada ao redor dos tubos de acesso seja mais ampla, uma vez que teoricamente o raio de influência cresce com a distância fonte-detetor.

Para fins de determinação da DOFD o erro na densidade pode ser adequadamente representado pelo desvio padrão da

densidade, definido como o quociente do desvio padrão teórico da taxa de contagem líquida, $\sigma_{r\rho}$ (ou σ_r , segundo ONO e MACHIDA, 1965)³², pelo módulo da inclinação da curva de resposta no ponto considerado, $|dr\rho/d\rho|$ (ou $|dr/d\rho|$, idem). Isto é:

$$\sigma_\rho = \frac{\sigma_{r\rho}}{|dr\rho/d\rho|} \quad (\text{VI.1})$$

Posto isto, o procedimento em seguida é se determinar o desvio padrão σ_ρ da densidade para cada valor médio de taxa de contagem líquida das curvas de resposta, traçando em seguida as correspondentes curvas "desvio padrão da densidade versus densidade", $\sigma_\rho \times \rho$. Pode-se então verificar visualmente e sem dificuldades que distâncias fonte-detetor (ou comprimentos de blindagem) levam a menores erros nas densidades que interessam, adotando-se a maior distância mas que ainda assim conduza a erros aceitáveis na densidade: a distância ótima fonte-detetor (DOFD). Tem-se assim a curva de resposta correspondente, que é adotada como a curva de calibração da sonda.

6.5.2 - Resultados

6.5.2.1 - As Curvas de Resposta

Para a determinação das curvas de resposta empregou-se c.p.'s de 4 materiais com diferentes densidades: água ($\rho=1,00$), brita 1 seca ao ar ($\rho = 1,44$), concreto leve de argila expandida ($\rho = 1,79$) e concreto simples ($\rho = 2,37$). As características desses corpos de prova, todos providos com o tubo de acesso padrão, de PVC, estão detalhados no item 5.5.3.2. As densidades dos materiais foram estimadas segundo o item 5.6. Ensaando os materiais menos a água para cada um dos comprimentos de blindagem l_s , iguais a 13, 17, 21, 25 e 29 cm, e fazendo-o

sempre para tempos de contagem de 1 min., obteve-se 5 respectivas curvas de resposta "taxa de contagem líquida média (\bar{r}_ρ) x densidade (ρ)", traçadas por 3 pontos (Fig.VI.8). As taxas médias líquidas \bar{r}_ρ de cada curva (Tabelas VI.8b-d), obtidas uma para cada densidade, foram calculadas por $\bar{r}_\rho = \bar{r} - \bar{r}_b$, sendo \bar{r} a taxa total média de 6 medidas em cada material e \bar{r}_b o "background" da sonda para o l_s da curva (item 6.4.1). As tabelas acima mencionadas apresentam todos esses valores para as curvas de resposta levantadas.

Na Fig.VI.8 os pontos assinalados correspondem aos valores experimentais \bar{r}_ρ . Por sua vez, as curvas traçadas são relativas às equações empíricas do item 3.3.3 que forneceram os melhores ajustes aos pontos (ρ, \bar{r}_ρ) obtidos para cada l_s . As referidas equações e seus parâmetros - determinados segundo expressões deduzidas pelo método dos mínimos quadrados (item 5.7) -, constam da Tab.VI.8a, bem como os respectivos coeficientes da correlação (eq.V.3).

As 5 curvas de resposta da Fig.VI.8 traçadas por 3 pontos foram aquelas consideradas para a determinação da DOFD. Para essas curvas não foi possível obter a medida relativa à densidade da água, dado que antes que isso fosse feito o detetor se avariou, apresentando-se com sua sensibilidade à radiação alterada em relação à original. Portanto, mesmo tendo sido possível determinar a DOFD a partir dessas curvas - igual a 27,5 cm ($l_s=25\text{cm}$)-, obtendo-se portanto a curva de calibração, fez-se necessário um novo levantamento desta (Tab.VI.8d), no qual agora se pôde tomar a medida correspondente ao c.p. de água com 95 cm de diâmetro ($\rho = 1,00$). Daí uma segunda curva para $l_s = 25 \text{ cm}^*$ na Fig.VI.8(2ª calibração da sonda), traçada por 4 pontos, sendo esta a curva de calibração que passou a vigorar. O asterisco é apenas para indi -

car que a mesma foi obtida para uma sensibilidade do detetor diferente da anterior (ap.B.2), com que foram obtidas as demais curvas, inclusive aquela de $l_s = 25$ cm (sem asterisco) - a curva de calibração original. Usou-se o asterisco também no l_s de todos os demais ensaios realizados com o detetor nessa nova condição.

6.5.2.2 - DOFD. A Curva de Calibração

Para a determinação da distância ótima fonte-detetor (DOFD) e, conseqüentemente, da curva de calibração (que é a curva de resposta que lhe corresponde), construiu-se na Fig.VI.9 as 5 curvas em traço cheio "desvio padrão teórico da densidade versus densidade", $\sigma_p \times \rho$, segundo os valores das Tab.'s VI.9a-b estimados com erro no tempo. Nessas tabelas os desvios padrões teóricos σ_p da densidade foram calculados pela eq.VI.1, estimando-se σ_{rp} sem (eq.III.35) e com (eq.III.43) o erro no tempo de contagem (desvio padrão $S_t = 5/600$ min., item 3.5.5), para se ter uma idéia da influência deste em σ_p .

Segundo a Fig.VI.9, na faixa de densidades próximas daquela do concreto a curva $\sigma_p \times \rho$ de menores valores foi a relativa ao comprimento de blindagem $l_s = 25$ cm, que corresponde a uma distância fonte-detetor $l = 27,5$ cm. Além do mais, segundo o item 6.2, com a sonda montada para a distância fonte-detetor $l = 27,5$ cm não se notou qualquer evidência de decréscimo no raio de influência no concreto, de 14 cm, comparado àquele para a maior distância fonte-detetor testada ($l = 31,5$ cm). Portanto, a distância fonte-detetor $l = 27,5$ cm ($l_s = 25$ cm) foi escolhida como a distância fonte-detetor (DOFD) da sonda, por otimizar o desempenho do aparelho ao permitir tanto os menores erros na densidade como um raio de influência razoável no con -

creto (14cm), acima, por exemplo, daquele da sonda de PREISS et alii (1978), que é de 10 cm.

Na Fig.VI.9 a curva $\sigma_p \times \rho$ em tracejado é a relativa à 2ª curva de calibração, não tendo sido levada em conta na determinação da DOFD. Consta aí apenas para efeito de comparação.

No cálculo de σ_p trabalhou-se com σ_{r_p} em vez de $\sigma_{\bar{r}_p}$ porque, na verificação da integridade, é interessante avaliar o erro para medidas únicas em cada profundidade, conduta esta que agiliza o método.

6.5.2.3 - O Ensaio dos c.p.'s de Água

Juntamente com a medida do c.p. de água Ø 95 cm para a curva de calibração ($l_s = 25 \text{ cm}^*$) ensaiou-se também os c.p.'s de água Ø 85 e 95 cm com a sonda montada para a maior distância fonte-detetor, relativa a $l_s = 29 \text{ cm}^*$. A intenção foi verificar, ainda que de maneira incompleta, se o c.p. Ø 95 cm estaria de fato contendo o maior raio de influência, como suposto inicialmente. Considerou-se esta hipótese como confirmada, dado que a pequena diferença de apenas 1% entre as taxas líquidas \bar{r}_p obtidas nos c.p.'s Ø 85 e 95 cm, 6792 e 6867 cpm respectivamente ($\bar{r}_D = 305 \text{ cpm}$), foram uma indicação de que as medidas praticamente já haviam se estabilizado para esses diâmetros na água. Conclui-se assim que o raio de influência com a sonda montada para $l_s = 29 \text{ cm}^*$ não estaria ultrapassado os limites do c.p. Ø 85 cm, podendo-se admitir, nessas condições, um raio de influência da sonda na água menor ou igual a 40 cm.

6.5.3 - Discussão dos Resultados

6.5.3.1 - Quanto às Curvas de Resposta

- 1- As curvas de resposta da sonda, Fig.VI.8, podem ser traçadas tanto em termos de "taxa de contagem total $\bar{r} \times \rho$ " como de "taxa de contagem líquida $\bar{r}_\rho \times \rho$ ". Como $\bar{r} = \bar{r}_\rho + \bar{r}_b$ e o background \bar{r}_b independe da densidade do material, preferiu-se academicamente trabalhar com a relação $\bar{r}_\rho \times \rho$. No entanto, na prática é mais cômodo lidar com uma curva de calibração para a taxa total, $\bar{r} \times \rho$, o que em nada prejudica a interpretação do ensaio quando \bar{r}_b é pequeno, além de dispensar a subtração $\bar{r} - \bar{r}_b = \bar{r}_\rho$ para se encontrar a taxa líquida.
- 2- Devido à taxa de contagem de fundo r_b ser insensível às variações da densidade do meio ensaiado, ao se trabalhar com uma curva $r \times \rho$ é desejável que r_b seja apenas uma pequena parcela da taxa total r , o que equivale a se ter um quociente r_b/r pequeno. Além disso à medida que a razão r_b/r cresce, chegando a 0,5 ou mais, diminui bastante a percepção a sentimento de um defeito no concreto, apenas por observação da taxa r . No entanto, a razão r_b/r não deve ser imposta de antemão, mas sim deve ser consequência das condições de escolha da curva de calibração, referidas no item 6.1. PLATA(1972)³⁷, em relação a sondas para avaliar a densidade de solos, se refere a um quociente r_b/r de cerca de 0,10 ou menor. Para a curva de calibração da sonda desta pesquisa, correspondente a $l_s=25\text{cm}^*$, Fig. VI.8, a razão r_b/r foi de 0,15 para $\rho = 2,37$; 0,08 para $\rho = 1,79$; 0,06 para $\rho = 1,44$ e 0,03 para $\rho = 1,00$, o que na faixa de densidade de solos concorda plenamente com as observações do autor acima. Portanto, para a sonda em estudo poder-se-ia trabalhar muito bem com uma curva de calibração em termos de

taxa de contagem total, $r \times p$, uma vez que para qualquer densidade a razão r_b/r é pequena.

- 3- As equações apresentadas na Tab.VI.8a para as diversas curvas de resposta, cujos gráficos estão na Fig.VI.8, foram as que forneceram em cada caso o melhor ajuste dentre as equações empíricas do item 3.3.3. A excelência dos ajustes pode ser avaliada pelo valor bastante elevado dos coeficientes de correlação correspondente (Tab.VI.8a), ou, qualitativamente, pela simples comparação das taxas líquidas medidas com as respectivas taxas líquidas estimadas através das equações interpoladas (Tab.'s VI.9a-b).
- 4- Comparando-se as curvas de resposta para $l_s=25$ e 25 cm^* (1ª e 2ª curvas de calibração), Fig.VI.8, nota-se nítida diferença da primeira para a segunda, esta a obtida após as avarias no detetor (ap.8.2), que se mostrou então com menor eficiência.

6.5.3.2 - Quanto à DOFD e Curva de Calibração

- 1- Na verdade o desvio padrão teórico σ_{rp} (ou melhor, a sua estimativa) possui uma pequena aleatoriedade, uma vez que, como mostra a eq.III.35, ele é calculado para as médias amostrais \bar{r} e \bar{r}_b no lugar das médias universais μ_r e μ_{r_b} , estas impossíveis de se conhecer. Já a aleatoriedade do desvio padrão real S_{rp} da taxa líquida é bem superior a de σ_{rp} , como se pode deduzir comparando as equações III.34 e III.37 tendo em vista a expressão V.7.

Portanto, para o cálculo dos valores das curvas "desvio padrão da densidade x densidade" preferiu-se utilizar σ_{rp} em vez de S_{rp} , de modo a se obter curvas com menor variabilidade e, assim, conseguir maior confiança na escolha da curva de calibração, relativa à DOFD. ONO e MACHIDA(1965)³² seguiram procedi-

mento análogo.

2- Segundo a Tab.VI.9b nota-se que os erros relativos $2\sigma_p / \rho$ na densidade foram animadoramente pequenos para a curva de calibração, não superando 2,4%. Estimou-se tais erros para o σ_p calculado com o erro no tempo devido à cronometragem manual (S_t , item 3.5.5). São, portanto, maiores que aqueles que se obteria com o cronômetro do scaler funcionando corretamente.

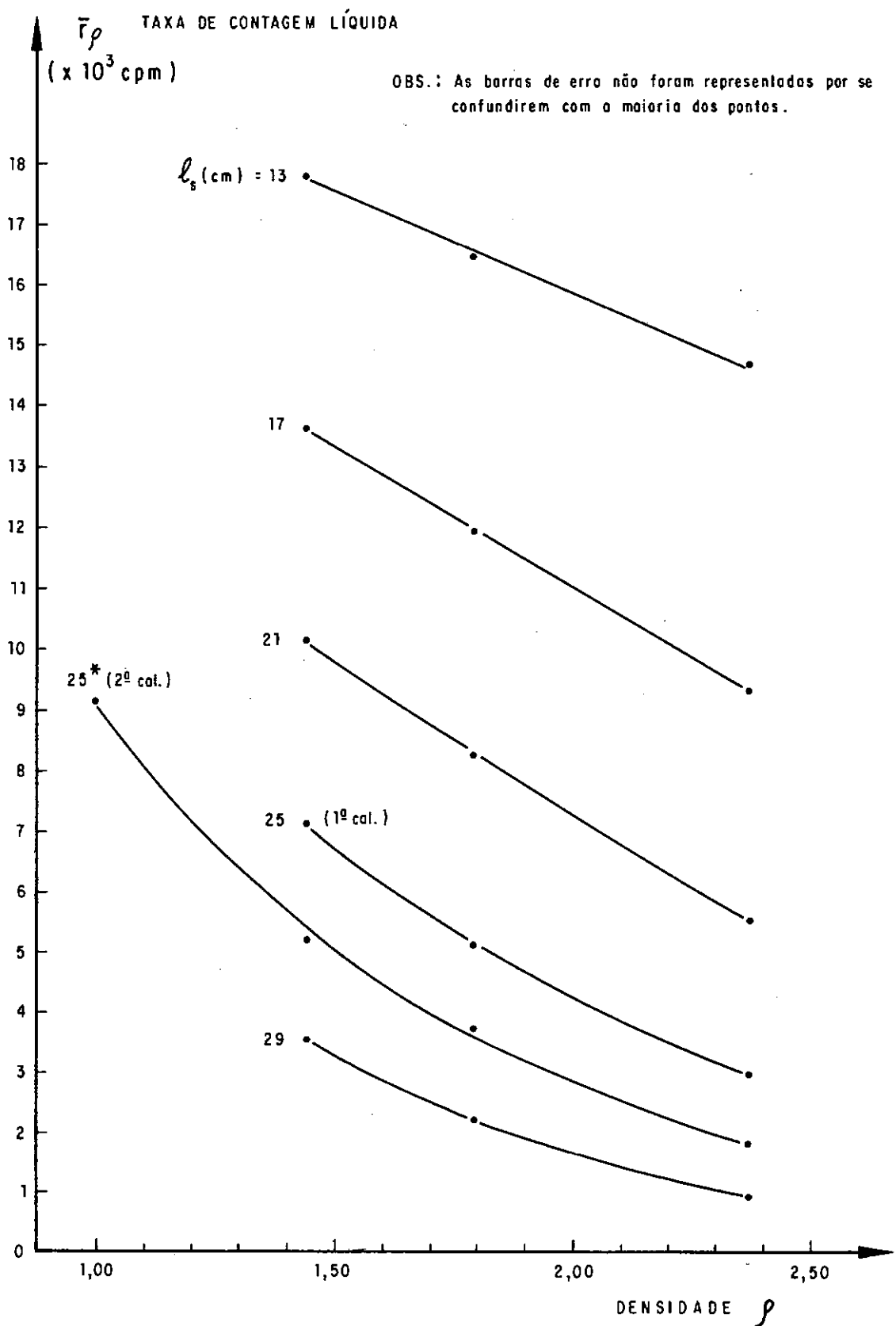


Fig. VI.8 - Curvas de resposta da sonda para os respectivos comprimentos de blindagem ℓ_s . Os pontos correspondem às medidas e às curvas às equações ajustadas (ver Tab. VI.8o).

ls (cm)	EQUAÇÃO DA CURVA AJUSTADA $r_p =$	PARÂMETROS DA CURVA	INCLINAÇÃO DA CURVA $dr_p / d\rho =$	PONTO DE MÁXIMO $\rho =$	PONTO DE INFLEXÃO $\rho =$	COEF. DE CORREL. C_c
13	$A \cdot \rho + B$	A= -3.342,23 B= 22.543,49	A	—	—	- 0,9987
17		A= -4.630,79 B= 20.265,81		—	—	- 1,0000
21	$A \cdot \rho \cdot e^{-B \cdot \rho}$	A= 38.720,33 B= 1,1861	$A \cdot e^{-B \cdot \rho} \cdot (1 - B \cdot \rho)$	1 / B 0,84	2 / B 1,69	0,9999
25	$A \cdot \rho^n \cdot e^{-B \cdot \rho}$	A= 32.605,56 B= 1,1397 n= 0,3922	$A \cdot \rho^{n-1} \cdot e^{-B \cdot \rho} \cdot (n - B \cdot \rho)$	n/B 0,34	$(n + \sqrt{n})/B$ 0,89	0,9998
29	$A \cdot \rho \cdot e^{-B \cdot \rho}$	A= 43.139,46 B= 1,9888	$A \cdot e^{-B \cdot \rho} \cdot (1 - B \cdot \rho)$	1 / B 0,50	2 / B 1,01	1,0000
25*	$A \cdot \rho^n \cdot e^{-B \cdot \rho}$	A= 29.677,64 B= 1,1873 n= 0,0227	$A \cdot \rho^{n-1} \cdot e^{-B \cdot \rho} \cdot (n - B \cdot \rho)$	n / B 0,02	$(n + \sqrt{n})/B$ 0,15	0,9989

Tab.WI.8a - Características das curvas de resposta ajustadas, representadas na Fig.VI.9.

	MEDIDAS DE r (cpm) t=1 min $l_s=13$ cm $\bar{r}_b=466$ cpm						\bar{r} (cpm)	S_r (cpm)	χ^2	\bar{r}_p (cpm)	S_{r_p} (cpm)
1,44	18253	18263	18290	18311	18121	18203	18254	68,05	1,27	17788	70,17
1,79	17015	16924	16831	16891	17089	16860	16935	98,60	2,87	16469	100,07
2,37	15041	15089	15149	15069	15276	15115	15123	83,60	2,31	14657	85,33
	MEDIDAS DE r (cpm) t=1 min $l_s=17$ cm $\bar{r}_b=330$ cpm						\bar{r} (cpm)	S_r (cpm)	χ^2	\bar{r}_p (cpm)	S_{r_p} (cpm)
1,44	13866	13805	13928	13988	14026	14032	13941	91,66	3,01	13611	92,40
1,79	12370	12353	12383	12241	12178	12184	12285	94,91	3,67	11955	95,63
2,37	9648	9645	9615	9715	9550	9600	9629	55,30	1,59	9299	56,52
	MEDIDAS DE r (cpm) t=1 min $l_s=21$ cm $\bar{r}_b=286$ cpm						\bar{r} (cpm)	S_r (cpm)	χ^2	\bar{r}_p (cpm)	S_{r_p} (cpm)
1,44	10356	10412	10402	10323	10480	10514	10414	72,32	2,51	10128	73,63
1,79	8573	8586	8490	8418	8651	8568	8548	81,66	3,90	8262	82,82
2,37	5891	5665	5837	5791	5922	5770	5813	92,50	7,36	5527	93,53

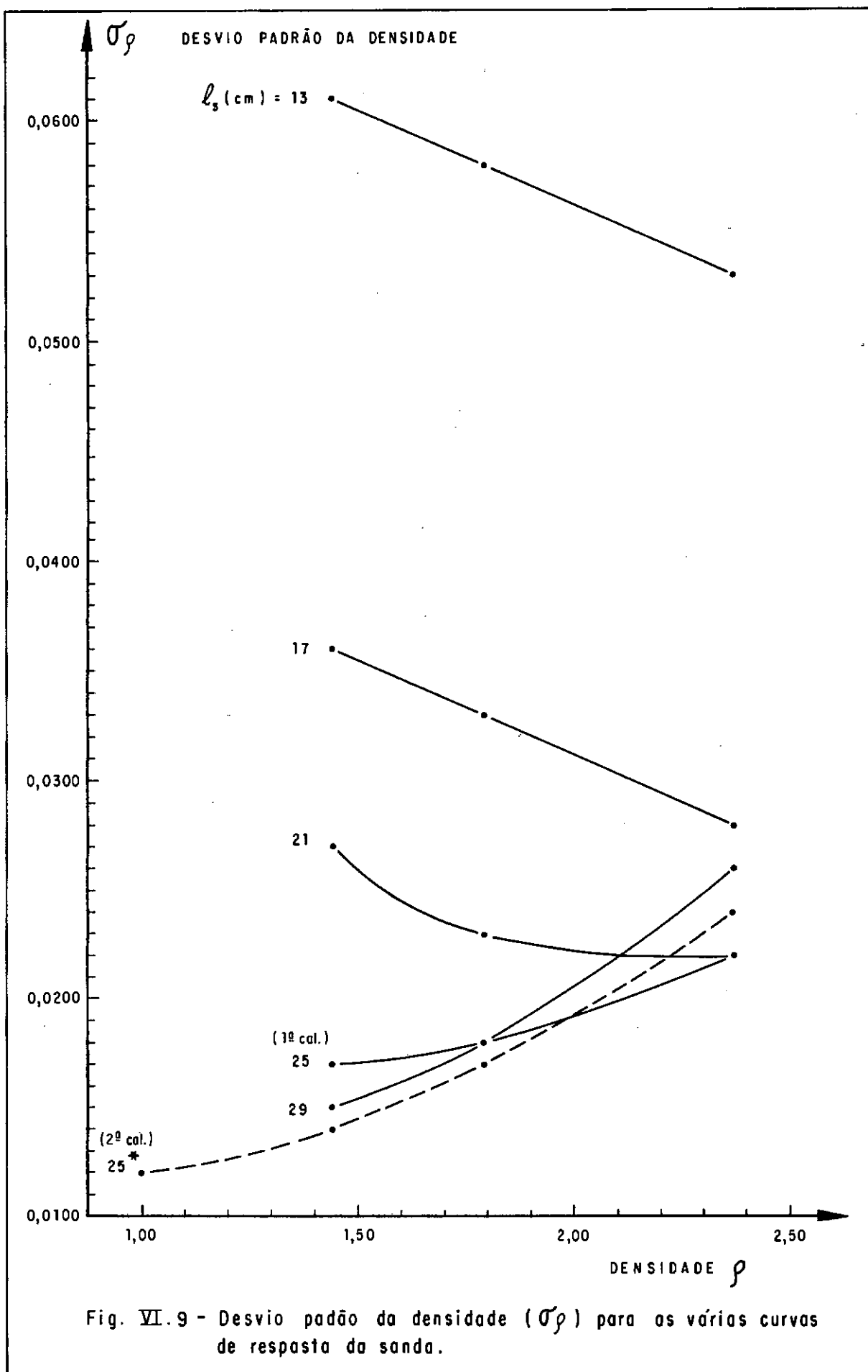
Tab.VI.8b - Taxas de contagem correspondentes às curvas de resposta para l_s igual a 13, 17 e 21 cm (Fig.VI.9).

	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t = 1 min	$l_s = 25$ cm		$\bar{r}_b = 282$ cpm			(cpm)	(cpm)		(cpm)	(cpm)
1,44	7354	7302	7485	7403	7487	7322	7392	80,30	4,36	7110	81,36
1,79	5406	5397	5386	5501	5375	5345	5402	53,06	2,61	5120	54,65
2,37	3207	3339	3291	3277	3264	3241	3270	44,94	3,09	2988	46,81
	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r}	S_r	χ^2	\bar{r}_p	S_{r_p}
	t = 1 min	$l_s = 29$ cm		$\bar{r}_b = 271$ cpm			(cpm)	(cpm)		(cpm)	(cpm)
1,44	3763	3813	3780	3857	3767	3771	3792	36,65	1,77	3521	37,89
1,79	2442	2431	2543	2456	2599	2457	2488	67,37	9,12	2217	68,05
2,37	1226	1176	1197	1161	1194	1150	1184	27,50	3,19	913	29,13

Tab.VI.8c - Taxas de contagem relativas às curvas de resposta para l_s igual a 25 e 29 cm (Fig. VI.9). As taxas para $l_s = 25$ cm corresponderam à curva de calibração da sonda. Esta, após problemas no detetor, teve suas taxas alteradas para as da tab.VI.8d, com figurando-se uma 2ª curva de calibração.

	MEDIDAS DE r (cpm)						\bar{r} (cpm)	S_r (cpm)	χ^2	\bar{r}_p (cpm)	S_{r_p} (cpm)
	t = 1 min					$\bar{r}_b = 320 \text{cpm}$					
1,00	9534	9697	9530	9334	9335	9401	9472	141,91	10,63	9152	143,07
1,44	5603	5483	5494	5544	5580	5544	5541	46,81	1,98	5221	50,22
1,79	4111	4095	4135	3922	3981	3944	4031	93,02	10,73	3711	94,78
2,37	2054	2145	2153	2131	2141	2107	2122	36,83	3,20	1802	41,07

Tab.VI.8d - Novas taxas de contagem para a curva de calibração da sonda, após problemas com o detetor, obtidas também para $l_s = 25 \text{ cm}^*$ - Fig.VI.9 (o asterisco indica apenas uma nova situação de sensibilidade do detetor). Esta segunda curva de calibração permaneceu inalterada até o final dos ensaios da pesquisa.



l_s (cm)	ρ	INCLINAÇÃO DA CURVA $\frac{dr_p}{d\rho}$ (cpm)	σ_{r_p} (cpm)		σ_p		AUMENTO EM σ_p C/O ER- RO EM t(%)	$2 \cdot \sigma_p / \rho$ (%)	TAXA DE CONTAGEM (cpm)	
			t SEM ERRO	COM ERRO	t SEM ERRO	COM ERRO			\bar{r}_p MEDIDA	\bar{r}_p ESTIMADA
13	1,44	- 3342	135,8	203,5	0,041	0,061	48,8	8,5	17.788	17.731
	1,79		131,4	193,4	0,039	0,058	48,7	6,5	16.469	16.561
	2,37		123,8	176,4	0,037	0,053	43,2	4,5	14.657	14.622
17	1,44	- 4631	118,7	166,0	0,026	0,036	38,5	5,0	13.611	13.598
	1,79		111,7	151,6	0,024	0,033	37,5	3,7	11.955	11.977
	2,37		98,9	127,4	0,021	0,028	33,3	2,4	9.299	9.291
21	1,44	- 4968	102,6	134,3	0,021	0,027	28,6	3,8	10.128	10.105
	1,79	- 5204	93,4	117,6	0,018	0,023	27,8	2,6	8.262	8.293
	2,37	- 4217	77,1	91,0	0,018	0,022	22,2	1,9	5.527	5.519

Tab.VI.9a - O desvio padrão σ_p e o correspondente erro relativo $2 \sigma_p / \rho$ na densidade (calculado com o erro estimado no tempo de contagem t) para as curvas de resposta de l_s igual a 13, 17 e 21 cm. (σ_{r_p} foi calculado para as taxas r_p estimadas).

l_s (cm)	ρ	INCLINAÇÃO DA CURVA $dr_p/d\rho$ (cm)	$\sigma_{r\rho}$ (cpm)		σ_ρ		AUMENTO EM σ_ρ c/ ERRO EM t (%)	$2\sigma_\rho/\rho$ (%)	TAXA DE CONTAGEM (cpm)	
			t SEM ERRO	COM ERRO	t SEM ERRO	COM ERRO			\bar{r}_ρ MEDIDA	\bar{r}_ρ ESTIMADA
25	1,44	- 6128	86,5	106,0	0,014	0,017	21,4	2,4	7110	7065
	1,79	- 4753	74,7	87,5	0,016	0,018	12,5	2,0	5120	5164
	2,37	- 2900	58,3	64,3	0,020	0,022	10,0	1,9	2988	2976
29	1,44	- 4587	62,9	70,4	0,014	0,015	7,1	2,1	3522	3544
	1,79	- 3141	51,0	55,0	0,016	0,018	12,5	2,0	2218	2196
	2,37	- 1438	36,4	37,7	0,025	0,026	4,0	2,2	914	918
25*	1,00	-10543	97,6	125,0	0,009	0,012	33,3	2,4	9152	9053
	1,44	- 6343	76,8	90,4	0,012	0,014	16,7	1,9	5221	5414
	1,79	- 4218	63,8	71,7	0,015	0,017	13,3	1,9	3711	3591
	2,37	- 2138	47,9	51,1	0,022	0,024	9,1	2,0	1802	1815

Tab.VI.9b - O desvio padrão σ_ρ e o correspondente erro relativo $2\sigma_\rho/\rho$ na densidade (calculado com o erro estimado no tempo de contagem t) para as curvas de resposta de l_s igual a 25 (1ª curva de calibração), 29 e 25cm* (2ª curva de calibração).

6.6 - Efeito na Taxa de Contagem Causado pela Folga no Tubo de Acesso

6.6.1 - Resultados

Para pesquisar os efeitos nas medidas da folga no tubo de acesso em relação à sonda, foram moldadas duas séries de 3 c.p.'s de concreto cada, descritas no item 5.5.3.3. Uma delas teve tubos de acesso de PVC e a outra tubos de aço. Em cada série de c.p.'s o diâmetro interno do tubo de acesso variou de um para outro corpo de prova, como indica a Tab.VI.10. Constam ainda desta tabela as 6 taxas de contagem totais obtidas com a sonda na 2ª calibração ($l_s=25\text{cm}^*$) em cada c.p., e as respectivas médias \bar{r} . Teve-se o cuidado de centrar a sonda nos tubos médio e maior de PVC e aço, por meio de dois anéis de PVC ajustados ao aparelho e adequados a cada tubo. Traçou-se então dois gráficos " $\bar{r} \times$ diâmetro interno D do tubo", um para cada série de c.p.'s, apresentados na Fig.VI.10. Nesta está apontado o diâmetro externo da sonda, ressaltando-se também, em outra escala horizontal, a folga entre a sonda e os tubos. Os gráficos correspondem a retas ajustadas aos pontos obtidos, cujas equações constam da mesma figura bem como os respectivos coeficientes de correlação.

6.6.2 - Discussão dos Resultados

1- O incremento na taxa de contagem total com o aumento de diâmetro do tubo de acesso é bem visível através da Fig.VI.10, sendo a relação nitidamente linear. O efeito é bem mais acentuado para os tubos de PVC. Esse incremento é causado pela folga entre o tubo e a sonda, que permite que os raios se defletindo em ambos consigam alcançar o detetor (Fig.II.28), in

crementando a taxa de contagem total com radiação que não provém do concreto ou material ensaiado. Portanto, a folga no tubo de acesso provoca como que um acréscimo no "background" da sonda, r_b . No entanto, nada se pode afirmar sobre o que ocorre com o valor da taxa de contagem líquida r_p , a parcela da taxa total que responde pela densidade do material ensaiado. Porém é provável que r_p não aumente.

O incremento linear na taxa com o aumento da folga no tubo de acesso concorda plenamente com os ensaios de ONO e MACHIDA (1965) ³².

2- Na Fig.VI.10 as inclinações das retas ajustadas aos pontos, $d\bar{r}/dD$, fornecem o incremento da taxa total por milímetro de incremento da folga no tubo de acesso de PVC ou aço, conforme o caso.

Para os tubos de aço $d\bar{r}/dD = 10,94$ cpm/mm e, para os tubos de PVC, $d\bar{r}/dD = 93,81$ cpm/mm.

O aumento relativo na taxa de contagem por mm a mais de folga no tubo, em relação à taxa \bar{r}_0 obtida nos c.p.'s com o tubo de menor diâmetro em cada caso, é dado por:

- para os tubos de aço: $\frac{d\bar{r}/\bar{r}_0}{dD} \times 100 = 0,9\%/mm$

- para os tubos de PVC: $\frac{d\bar{r}/\bar{r}_0}{dD} \times 100 = 4,4\%/mm$

Para os 3 c.p.'s com tubos de PVC é possível avaliar o erro relativo na densidade do concreto por mm a mais de folga no tubo de acesso:

$$\frac{dp/p}{dD} \times 100 = 1,9\%/mm$$

Em relação aos tubos de PVC principalmente, essas estimativas mostram claramente que, quando a intenção é a medida da densi

dade do concreto, não se deve de modo algum utilizar nas estacas tubos de diâmetro comercial acima daquele empregado na calibração, sob pena de se obter densidades significativamente menores que as reais. Essas recomendações são válidas na medida em que, tanto para os tubos de aço como para os de PVC, a diferença entre os diâmetros comerciais disponíveis é grande (Tab.VI.10).

Se a intenção é avaliar a integridade pelo perfil radiométrico também se deve evitar o uso de diâmetros comerciais acima daquele da calibração, principalmente para tubos de PVC, por não se saber como a taxa líquida r_p - e portanto a sensibilidade do método a defeitos - é afetada por um aumento da folga no tubo.

Obviamente, a utilização de tubos de acesso de diâmetros abaixo daquele da calibração conduz a efeitos contrários aos acima apontados, mas igualmente indesejáveis.

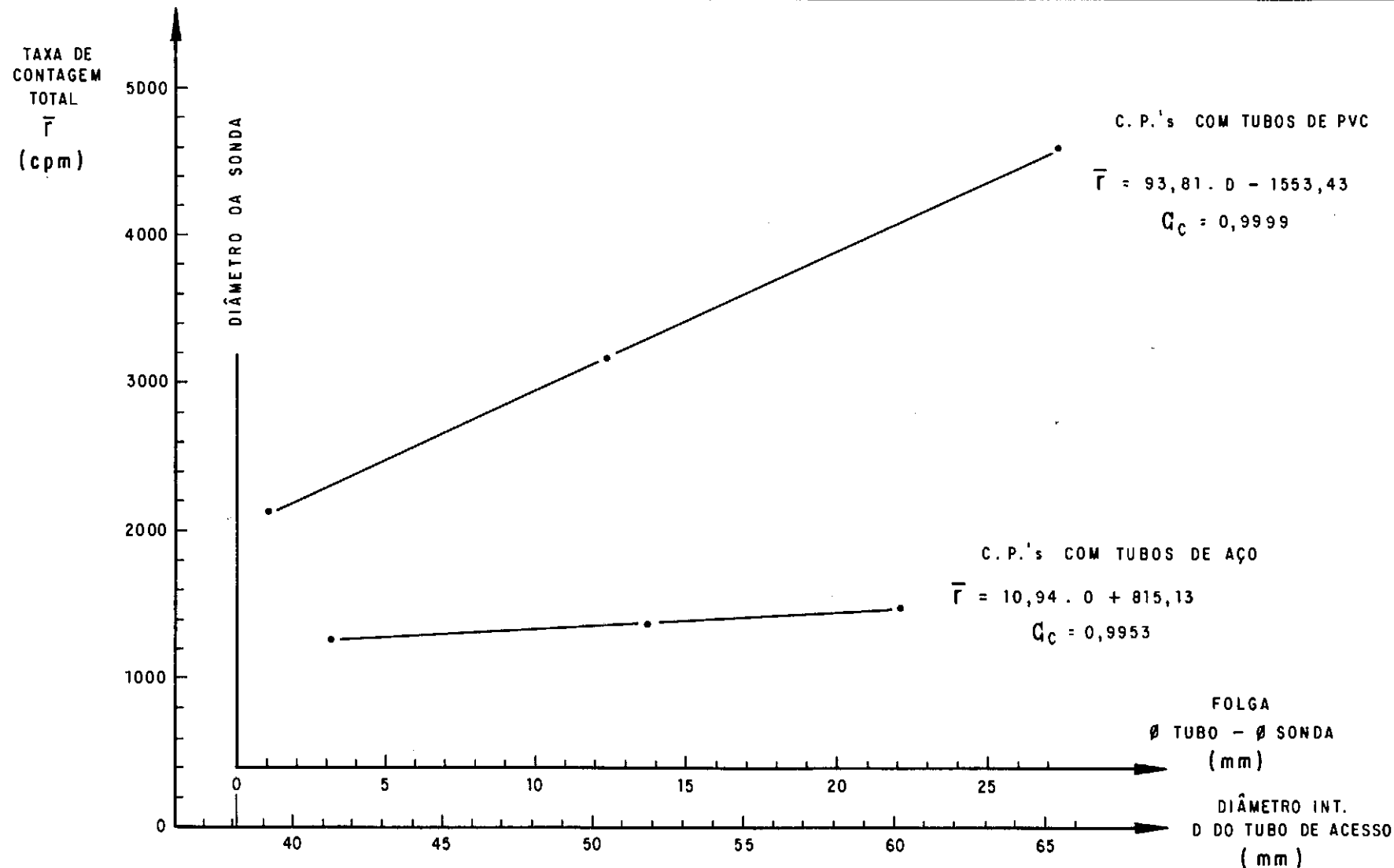


Fig. VI.10 - Influência do diâmetro interno do tubo de acesso na taxa de contagem total obtida em c.p.'s \varnothing 45cm de concreto ($\ell_s = 25 \text{ cm}^*$).

Ø NOM.EXT. DO TUBO NO C.P.(m m)	MATERIAL E Ø INT. REAL(m m)	MEDIDAS DE r (cpm)							\bar{r}	S_r	χ^2
		$l_s = 25 \text{ cm}*(2^a \text{ cal.})$ $t = 1 \text{ min}$							(cpm)		
48(Padrão)	TUBOS DE PVC	39,2	2117	2181	2111	2161	2167	2071	2135	41,98	4, 13
60		50,5	3216	3230	3146	3018	3180	3192	3164	77,12	9,40
75		65,4	4743	4667	4563	4474	4574	4518	4590	98,96	10,67
48	TUBOS DE AÇO	41,3	1257	1266	1290	1340	1235	1246	1272	38,09	5,70
60		51,8	1356	1308	1435	1401	1323	1399	1370	49,55	8,96
73		60,2	1517	1433	1473	1520	1490	1448	1480	35,64	4,29

Tab.VI.10 - Ensaio dos c.p.'s Ø 45 cm de concreto, com tubos de acesso de PVC e aço em vários diâmetros, para avaliar a influência destes na taxa de contagem total E.

6.7 - Ensaios dos C.P.'s com Defeitos Simulados

6.7.1 - Resultados

A sonda foi utilizada estando na sua 2ª calibração (ap.B.2), correspondente à curva para $l_s = 25\text{cm}^*$ na Fig.VI.8.

Na análise das medidas feitas nos c.p.'s de concreto com defeitos simulados, para avaliação da sensibilidade da sonda aos mesmos, preferiu-se, por facilidade, lidar com as taxas de contagem totais r . Os tempos de contagem t foram sempre de 1 min, tendo-se obtido 6 medidas em cada c.p. e tomado a média \bar{r} como o valor representativo. Os c.p.'s com defeitos simulados, num total de 7, e mais o c.p. com armação, estão convenientemente descritos no item 5.5.3.4. O c.p. de concreto padrão, íntegro, está detalhado no item 5.5.3.1. Neste, para um maior controle das medidas, foram obtidos 3 conjuntos de contagens, intercalados com os conjuntos de medidas para os demais c.p.'s, todos apresentados na Tab.VI.11 na ordem em que foram obtidos. Para as análises e na Fig.VI.11, tomou-se como medida representativa do c.p. padrão a média das 3 taxas médias nele obtidas, apresentadas na Tab.VI.11, o que forneceu $\bar{r} = 2.165 \text{ cpm}$.

A Fig.VI.11 permite visualizar as diferenças nas medidas efetuadas nos c.p.'s com defeitos simulados em relação ao c.p. padrão, mostrando ainda em cada caso a variação da taxa de contagem, dada pela respectiva barra de erro estimada para dois desvios padrões σ'_r . O desvio padrão σ'_r foi calculado conforme o item seguinte. Portanto as barras de erro limitam um intervalo $\bar{r} \pm 2 \cdot \sigma'_r$, onde há 95% de probabilidade de ocorrerem os valores de r .

Utilizou-se o desvio padrão σ'_r em vez de σ_r porque interessava a preciar a dispersão que ocorreria em medidas únicas a cada profundidade na estaca, conduta esta que é desejável por agilizar a verificação da integridade.

6.7.2 - Discussão dos Resultados

1- Admitiu-se para o concreto dos c.p.'s a densidade média $\bar{\rho} = 2,37$, com um desvio padrão $S_\rho = 0,02$, valores determinados pelas amostras retiradas durante as concretagens (item 5.6).

Nas medidas praticadas no concreto de uma estaca a variabilidade das taxas de contagem será influenciada por dois fatores distintos: pela flutuação estatística inerente à própria taxa, σ_r , e, ainda, pela flutuação intrínseca da densidade do concreto, S_ρ , que provoca uma segunda flutuação da taxa de contagem, S'_r . Ocorre que $S'_r = |dr/d\rho| \cdot S_\rho$, com $|dr/d\rho| = 2138$ cpm no presente caso (Tab.VI.9b, para $l_s = 25$ cm* e $\rho = 2,37$) e S_ρ da do acima. σ_r é calculado pela eq.III.32.

σ_r e S'_r podem então ser combinados pela teoria dos erros (BEERS, 1962) para se obter a flutuação global σ'_r que se pode esperar para a taxa de contagem.

$$\sigma'_r = \sqrt{(\sigma_r)^2 + (S'_r)^2} \quad (\text{VI.2})$$

Esta foi a expressão utilizada no cálculo das barras de erro globais da Fig.VI.11, iguais a $\bar{r} \pm 2 \cdot \sigma'_r$. O intervalo interior assinalado nessas barras de erro corresponde apenas à flutuação intrínseca da taxa de contagem, $\bar{r} \pm 2 \cdot \sigma_r$, aquela que de fato corresponde aos ensaios realizados.

As barras de erro ditas globais interessam na medida em que permitem avaliar a sondagem gama a partir da variabilidade global das medidas, a maior que se pode esperar. No entanto, convém notar que, em uma estaca, pode ser que o desvio padrão S_p da densidade do concreto seja algo acima do estimado para a pesquisa, o que acarretaria barras de erro globais um pouco maiores.

- 2- As barras de erro na Fig.VI.11 mostram que a flutuação da taxa de contagem não chega prejudicar a avaliação do concreto, dado que não impediria a identificação dos defeitos mais relevantes: a junta fria e as duas bolas - defeito maiores. Quanto ao tubo-defeito, a sua percepção só se deu de modo inequívoco estando o mesmo contíguo ao tubo de acesso. Notou-se, com o afastamento em relação a este, acentuado decréscimo na sensibilidade do método a esse tipo de anomalia. Tal é constatado ao se comparar a taxa média para o tubo-defeito adjacente com aquela bem inferior do tubo-defeito a 13cm do tubo de acesso, defeito este no limiar do raio de influência da sonda no concreto (14cm).
- 3- A taxa obtida no c.p. com o tubo-defeito a 6,5 cm do tubo de acesso pode ser considerada como anômala, dado que seria de se esperar uma medida intermediária àquelas dos outros dois c.p.'s com tubos-defeito e superior à do c.p. padrão.
- 4- O tubo-defeito adjacente foi acusado com uma taxa média razoavelmente superior a da junta fria, embora na estaca este último defeito seja bem mais importante. Esse resultado sugere que o método deve ser bastante sensível à falta de cobrimento da armação, principalmente se esta ocorrer num trecho com altura próxima ou superior àquela do volume de influência da sonda.

- 5- A taxa de contagem para os c.p.'s com as bolas-defeito não aumentou na proporção dos volumes dessas bolas, certamente devido a que o fluxo de fótons dentro do volume de influência diminui com a distância ao tubo de acesso (item 2.3.4.6d) e o centro de gravidade da bola se afasta do tubo à medida que o volume da mesma aumenta.
- 6- Notar que os defeitos em que as barras de erro se superpõem poderiam ser confundidos entre si, com uma probabilidade que aumenta com essa superposição.
- 7- Os defeitos da bola menor de isopor (este de pouca importância) e do tubo-defeito a 13 cm do tubo de acesso poderiam ser confundidos com concreto íntegro.
- 8- Como seria de se esperar, o efeito da armação na medida em concreto íntegro foi o de diminuir a taxa de contagem correspondente, porém não de maneira muito acentuada (Fig.VI.11). Pode-se considerar que se a armação estivesse presente nos c.p.'s com defeito, a sua influência seria, aproximadamente, a de diminuir as respectivas medidas da mesma quantidade em o foi a taxa de contagem obtida no concreto íntegro, não se alterando, pelo menos substancialmente, as conclusões acima apontadas.

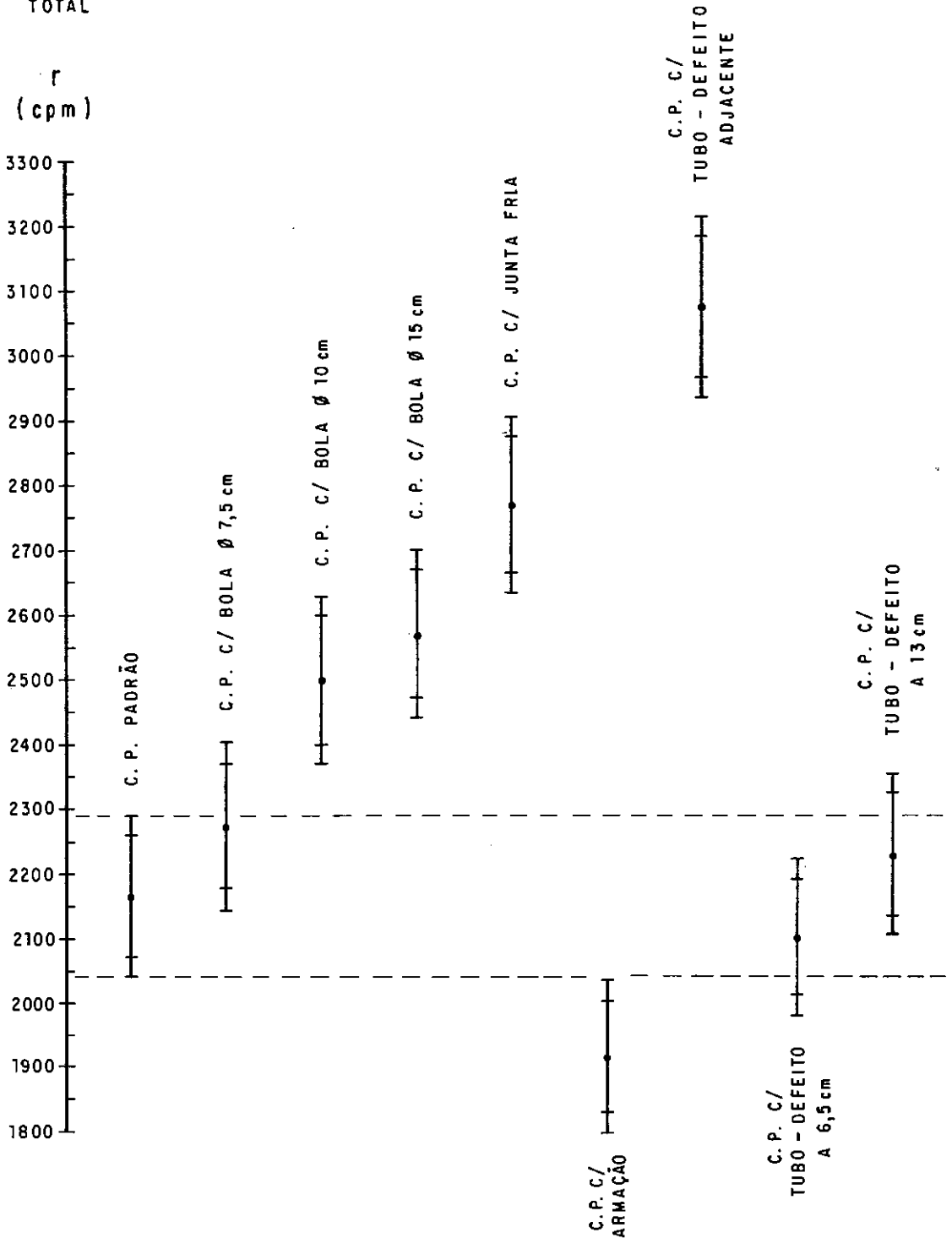
TAXA DE CONTAGEM
TOTAL

Fig. VI. 11 - Taxas de contagem totais obtidas no c. p. padrão e nos c. p.'s de concreto com defeitos simulados e armação. As barras de erro limitam o intervalo $r \pm 2 \cdot \sigma_r$, onde há 95% de probabilidade de ocorrerem os respectivos valores de r (ensaios com a sonda montada para $\ell_s = 25$ cm).

C.P. Ø 45 cm		MEDIDAS DE r (cpm) t = 1 min l _s = 25 cm* r _b = 320 cpm						r̄ (cpm)	S _r (cpm)	χ ²	r̄ _p (cpm)	S _{r_p} (cpm)
PADRÃO		2179	2130	2136	2125	2124	2142	2139	20,59	0,99	1819	27,45
BOLA DE ISOPOR	Ø 7,5 cm	2178	2285	2230	2340	2241	2365	2273	70,70	11,00	1953	73,00
	Ø 10 cm	2495	2470	3484	2450	2551	2528	2496	37,38	2,80	2176	41,57
	Ø 15 cm	2600	2670	2582	2461	2508	2611	2572	75,40	11,05	2252	77,56
JUNTA FRIA = 1,45		2700	2750	2813	2742	2769	2856	2772	55,34	5,52	2452	58,25
PADRÃO		2193	2173	2158	2166	2042	2240	2162	65,72	9,99	1842	68,19
COM ARMAÇÃO		1908	2012	1879	1883	1964	1853	1916	60,02	9,40	1596	62,71
C/TUBO ADJACENTE		3100	3110	3203	3024	2965	3047	3075	82,12	10,97	2755	84,11
C/TUBO A 6,5 cm		2090	2112	2070	2154	2068	2128	2104	34,02	2,75	1784	38,57
C/TUBO A 13 cm		2168	2295	2222	2184	2286	2236	2232	51,77	6,00	1912	54,87
PADRÃO		2335	2143	2144	2176	2191	2176	2194	71,61	11,69	1874	73,88

Tab.VI.11 - Taxas de contagem dos ensaios dos c.p.'s com defeito simulado e do c.p. com armação (ver Fig.VI.11).

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA

7.1 - Conclusões

- 1- A sonda de raios gama projetada apresentou boa sensibilidade a defeitos no concreto. Nos ensaios notou-se que mesmo defeitos relativamente pequenos podem ser percebidos, com os defeitos mais significativos sendo nitidamente acusados. No entanto, a área ensaiada ao redor dos tubos é restrita, com cerca de 14cm de penetração no concreto.
- 2- Em relação à sonda de PREISS e CAISERMAN (1975) , conseguiu-se aumentar o raio de influência no concreto em aproximadamente 4cm, de 10 para 14 cm. Isso certamente foi obtido pela maior distância fonte-detetor adotada (27,5 cm contra menos de 20cm) e pela utilização da fonte de cobalto 60, cuja radiação possui o dobro da energia daquela dos raios gama do céscio 137, este o radionuclídeo empregado pelos referidos autores.
- 3- O comprimento de 50m do cabo coaxial utilizado não dificultou de modo algum o bom desempenho do sistema de medição, o que mostra que o método pode ser aplicado a estacas escavadas com os maiores comprimentos executáveis atualmente.
- 4- Devido à pequena folga que deve haver entre o diâmetro externo da sonda e o diâmetro interno do tubo de acesso (item 2.3.4.6b); uma certa curvatura deste pode, em uma estaca, acarretar o aprisionamento da sonda no seu interior. Portanto, é recomendável que antes do ensaio seja baixada ao longo de todos os tubos do fuste uma sonda falsa, de mesmas dimensões e peso da verdadeira, verificando então se é possível o livre trânsito do aparelho sem a sua perda.

- 5- Após determinada a curva de calibração é desejável que se adote um tempo de contagem menor, o que diminui a taxa de contagem r , σ_r e, assim, σ_p (eq.VI.1), dado que essa conduta não altera a inclinação da curva. Altera, isto sim, a magnitude das taxas de contagem da curva de calibração, cujos valores passam a ser reduzidos na mesma proporção em que o foi o tempo de medida. Por outro lado, diminuir o tempo de contagem t reduz proporcionalmente tanto r_p como r_b .

Desse modo, diminuir o tempo de contagem ou de ensaio t , após obtida a curva de calibração, é um procedimento que torna σ_p menor sem alterar a sensibilidade da sonda a variações de densidade. Logo esta é uma conduta acertada, mesmo porque contribui para fazer a verificação da integridade mais rápida.

No entanto, não se pode adotar um tempo de contagem muito pequeno, que cause uma flutuação da taxa com a magnitude da variação provocada por um defeito no concreto que se identifique como significativo. Esse defeito poderia ser considerado como sendo o da bola de isopor de 15 cm de diâmetro, cujo aumento provocado na taxa de contagem foi de 19% em média. Isto é:

$(2572-2165)/2165 = 0,19$, segundo as taxas \bar{r} da Tab.VI.11 relativas ao c.p. de concreto íntegro e ao c.p. com o referido defeito.

Para que, com 95% de confiança, se tivesse sempre um erro de flutuação menor ou igual a 19%, dever-se-ia ter uma taxa de contagem no concreto de, pelo menos, 500cpm. Ou seja, a partir da eq.VI.2:

$$\frac{2 \sqrt{\bar{r} + 1828,42}}{\bar{r}} \leq 0,19 \Rightarrow \bar{r} \geq 500 \text{ cpm}$$

No entanto, é desejável que o erro de flutuação da taxa de contagem, com 95% de probabilidade, seja no mínimo 3 vezes menor que a variação da mesma causada pelo defeito significativo, o que levaria, no caso da sonda desta pesquisa, a se trabalhar com taxas de contagem maiores ou iguais a 2000 cpm no concreto. Ou seja, a partir da eq.VI.2:

$$\frac{2}{\bar{r}} \frac{\bar{r} + 1828,42}{\bar{r}} \leq 0,19/3 \Rightarrow \bar{r} \geq 2000 \text{ cpm}$$

Portanto, para a curva de calibração determinada para a sonda nos ensaios (relativa a $l_s = 25\text{cm}^*$, Fig.VI.8), essa condição é satisfeita com um tempo de contagem de 1 min, por coincidência igual ao adotado nos ensaios.

O tempo de contagem pode ser grandemente reduzido com o emprego de um detetor de cintilação, que chega a ser de 10 a 100 vezes mais eficiente que o Geiger-Müller (item 2.3.4.3b), o que agilizaria muito o ensaio das estacas. Por exemplo, considerando o tempo de medida de 1 min, que se mostrou acima ser adequado para a sonda estudada, e um detetor de cintilação 10 vezes mais eficiente que o G-M utilizado, o tempo de medida poderia então ser reduzido em 10 vezes, passando a ser de 6 segundos apenas em cada profundidade na estaca (há, inclusive, a possibilidade do tempo de medida ser ainda menor, com um detetor de cintilação mais eficiente).

- 6- A verificação de estacas por sondagem gama com uma sonda munida de detetor Geiger-Müller, como a desta pesquisa, tornaria muito lento o ensaio das estacas na obra. Com a sonda utilizada nos ensaios levar-se-ia, por exemplo, 10 horas para a verificação de uma estaca de 20 m com 3 tubos de acesso (medidas tomadas a

cada 10 cm de profundidade durante 1 min. Nas mesmas bases, com um detetor de cintilação 10 vezes mais eficiente (o que não é difícil de se conseguir) o tempo de ensaio da mesma estaca seria reduzido em 10 vezes, passando a ser de 1 hora apenas. Portanto, é imprescindível para um bom desempenho do método, no que diz respeito à rapidez, a utilização de um detetor de cintilação na sonda.

- 7- Vários dos ensaios de integridade, como a sondagem gama, em muitas circunstâncias são positivos na percepção de vários tipos de defeitos significativos em uma estaca, os quais, de outro modo, só poderiam ser acusados ou confirmados através de escavação. O estudo bibliográfico realizado neste trabalho permite apontar com um maior interesse, pelas informações que conseguem proporcionar, 3 ensaios de verificação da integridade mais efetivos: o vibratório (ou o ensaio de impacto), o sônico e a sondagem gama, esta com algumas boas qualidades de fato confirmadas pelos ensaios desta pesquisa. Os resultados experimentais obtidos apontam a sondagem gama como um ensaio de integridade que, apesar de limitação intrínsecas, apresenta bom potencial e, portanto, há real interesse em aperfeiçoá-lo e torná-lo operacional no campo.

7.2 - Sugestões para Pesquisa

- 1- Visando tornar a sondagem gama por retrodispersão operacional no campo, avaliar o desempenho da sonda munida de um detetor de cintilação que se comprove ser de elevada eficiência e, ainda, possua o maior cristal possível, de modo a aumentar o volume

sensível à radiação e assim diminuir ainda mais o tempo de ensaio das estacas no canteiro.

- 2- Estudar a influência da composição química nas taxas de contagem obtidas em materiais de mesma densidade mas: quimicamente diferentes. Caso essa influência seja de fato relevante procurar evitá-la com as providências sugeridas no item 2.3.4.6g.
- 3- Procurar agilizar ao máximo o ensaio em uma estaca, adotando-se um sistema automático tanto para a medida e reposicionamento da sonda como para o registro dos dados obtidos. Assim, poderia ser plotado um perfil radiométrico ou de densidades à medida que o ensaio transcorresse.

Uma outra possibilidade é realizar o ensaio com um dispositivo que mova a sonda no tubo de acesso a uma velocidade constante, procedimento brevemente mencionado pela IAEA (1971)²⁰. No entanto, não foi possível obter literatura que se detivesse na análise dessa técnica.

APÊNDICE A

PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÃO

O autor, durante a manipulação da sonda nuclear nos ensaios da pesquisa, procurou se utilizar da melhor maneira possível dos 3 fatores de proteção contra irradiação externa: tempo, distância e blindagem.

Quanto ao tempo, as sequências mais demoradas dos ensaios e da montagem e desmontagem da sonda foram antes treinadas com o aparelho sem a fonte, de modo a aumentar a rapidez dessas operações e diminuir o tempo de exposição à radiação.

Durante os ensaios procurou-se guardar um afastamento adequado em relação à sonda, o que foi conseguido com o emprego de uma garra mecânica manual, própria para manipulação de material radioativo, e o auxílio de uma roldana e cabo para içar e baixar a sonda no tubo de acesso dos c.p.'s, para onde o aparelho era orientado com a garra.

Como blindagem, o autor se utilizou ao longo dos ensaios e preparativos de um avental tecido com fios de chumbo.

Sempre que lidando com material radioativo portou o autor um filme dosimétrico para o controle mensal da dose de radiação recebida. Esse controle foi realizado pelo Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, e não acusou em nenhuma vez dose superior a 20 mrem/mes, esta a dose mínima percebida pelos aparelhos de leitura do filme. Esse resultado atestou a validade das medidas de proteção contra radiação acima.

Como controle adicional da radiação empregou-se durante

os ensaios um gamâmetro calibrado adequadamente, para que se soubesse, em cada local e instantaneamente, a dose de radiação em mrem/hora a que se estava submetido. Esta deveria ser menor ou igual a 2,5 mrem/hora, a dose máxima permissível.

APÊNDICE B

A ESTABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

B.1 - A Estabilidade do Scaler.

As características de estabilidade da alta-tensão e do cronômetro do scaler (item 5.3) se deterioraram ao longo dos ensaios.

Verificou-se em uma aferição preliminar dos aparelhos uma que da razoavelmente pequena mas contínua da alta-tensão fornecida pelo scaler ao detetor, o que poderia trazer problemas nos ensaios mais longos. Para se poder medir a alta-tensão no próprio detetor e reajustá-la sempre que preciso, foi previsto um fio F no final do cabo coaxial, entre o detetor e o circuito resistor-capacitor (Fig.V.4a). Por esse dispositivo mediu-se a tensão com um multímetro antes e após cada conjunto de 6 medidas dos ensaios, reajustando-a à tensão de operação do detetor quando era necessário.

No que é relativo ao cronômetro do scaler, a uma certa altura dos ensaios constatou-se variações de até 30s em tempos de contagem que deveriam ser de 1 min, com flutuações correspondentemente elevadas nas contagens dos conjuntos de medidas. De concepção eletromecânica, o cronômetro se mostrou de difícil reparo, com o que a marcação do tempo desde então passou a ser feita manualmente (item 3.5.5).

B.2 - A Estabilidade do Detetor

Em dado momento no transcorrer dos ensaios, ao se tomar novo conjunto de medidas de controle (item 5.9) constatou-se significativa alteração na taxa de contagem média em relação às anteriores.

Tal ocorreu após a obtenção das curvas de resposta e determinação da curva de calibração, que correspondeu a $l_s = 25$ cm (item 6.5). Com isso suspeitou-se de uma mudança na sensibilidade do detetor à radiação. Surgiu então a necessidade de se levantar novamente a curva de calibração, o que confirmou as suspeitas. As novas taxas de contagem médias obtidas ($l_s = 25$ cm*, Fig.VI.8) se mostraram bastante inferiores às da curva original ($l_s = 25$ cm, Fig.VI.8). Confi gurou-se assim uma 2ª calibração da sonda, diferente da anterior, caracterizada principalmente por uma menor sensibilidade do dete - tor à radiação (taxas de contagem menores).

A 2ª calibração da sonda permaneceu inalterada até o final dos demais ensaios da pesquisa. Com essa nova condição da sonda fo ram realizados os ensaios dos itens 6.2.2.2, 6.5.2.3, 6.6 e 6.7, todos posteriores à 2ª calibração. Nesses ensaios, usou-se um aste risco no comprimento de blindagem l_s para denotar este fato.

Da 1ª para a 2ª calibração notou-se, curiosamente, uma eleva ção das taxas de contagem de baixo valor - BGA e BGS, item 6.4 -, e uma diminuição das taxas de maior valor, como as da curva de ca libração (Fig.VI.8).

Após os ensaios apresentados nesta pesquisa o detetor se a variou em definitivo, impedindo a realização de alguns ensaios complementares que se pretendia.

BIBLIOGRAFIA

1. AOKI, N. "Considerações sobre Projeto e Execução de Fundações Profundas", Palestra proferida no Club de Engenharia do Rio de Janeiro em 25/11/81, Publicação de Estacas Franki Ltda.
2. BAKER, C.N. Jr. e KHAN, F. "Caisson Construction Problems and Correction in Chicago", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 97, nº SM2, p. 417-440, february 1971.
3. BALLARO, L.F. e GARDNER, R.P. "Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods", National Cooperative Highway Research Program, Report 14. Highway Research Board, EUA, 1965.
4. BEERS, Y. Introduction to the Theory of Error, Addison-Wesley Publishing Company, Menlo Park, 2.^a edição, 1962.
5. BOBROWSKI, J.; BARDHAN-RDY, B.K.; MAGIERA, R.H. e LDWE, R.H. "The Structural Integrity of Large Diameters Bored Piles", Behaviour of Piles, Proceedings of the Conference, 15-17 september 1970. Institution of Civil Engineers, London , 1971.
6. CZUBEK, J.A. "Physical Possibilities of Gamma-Gamma Logging", Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw (18-22 october 1965). IAEA, Vienna, 1966, vol. 2, p. 249-275.

7. DAVIS, A.G. e DUNN, C.S. "From Theory to Field Experience with the Non-destructive Vibration Testing of Piles", Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2, vol. 57, p. 571-593, december 1974.
8. DAVIS, A.G. e GUILLERMAIN, P. "La Vibration des Pieux: Interpretations Geotechniques", Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nº 380, fevrier 1980. Serie: Sols et Foundations nº 170.
9. DAVIS, A.G. e ROBERTSON, S.A. "Economic Pile Testing", Ground Engineering, vol. 8, nº 3, p. 40-43, may 1975.
10. _____. "Vibration Testing of Piles", The Structural Engineer, vol. 54, nº 6, p. A7-A10, june 1976.
11. FELTRE, R. e YOSHINAGA, S. Atomística, vol. 2. Editora Moderna Ltda., São Paulo, 1970.
12. FRANCISCHINI, F.A. Sonda Multidirecional, Publicação do Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, julho de 1973.
13. FUSCO, P.B. Fundamentos Estatísticos da Segurança das Estruturas, Editora da Universidade de São Paulo/Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1.^a edição, 1977.
14. GARDNER, R.P.; DUNN, W.L.; McDOUGALL, F.H. e LLIPLO, W.J. "Optimization of Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods", National Cooperative Highway Research Program, Report 125. Highway Research Board, EUA, 1971.

15. GARDNER, R.P.M. e MOSES, G.W. "Testing Bored Piles Formed in Laminated Clays", Civil Engineering and Public Works Review, vol. 68, n° 198, p. 60-63, january 1973.
16. GARDNER, R.P. e ROBERTS, K.F. "Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods", National Cooperative Highway Research Program, Report 43. Highway Research Board, EUA, 1967.
17. HEARNE, Jr., T.M.; STOKOE, II, K.H. e REESE, L.C. "Drilled-Shaft Integrity by Wave Propagation Method", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 107, n° GT10, p. 1327-1344, october 1981.
18. HIGGS, J.S. e ROBERTSON, S.A. "Integrity Testing of Concrete Piles by Shock Method", Concrete, october 1979, p. 31-33.
19. HOLMAN, J.P. Métodos Experimentales para Ingenieros, Libros McGraw-Hill de México S.A., 1977, tradução da 2.^a edição em inglês da mesma editora.
20. IAEA. "Nuclear Well Logging in Hidrology", Technical Reports Series n° 126, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1971.
21. IPR-UFMG. Curso de Aplicação de Radioisótopos - Parte Básica, Publicação da Divisão de Aplicação de Radioisótopos do Instituto de Pesquisas Radioativas da UFMG, Belo Horizonte, 1968.
22. JAFFEY, A.H. "Statistical Tests for Counting", Nucleonics, vol. 18, n° 11, november 1960, p. 180-184.

23. LEÃO, M.A.C. Princípios de Biofísica, Universidade Federal de Pernambuco, Editora Universitária, Recife, 1980.
24. LEVY, J.F. "Sonic Pulse Method of Testing Cast-in-situ Concrete Piles", Ground Engineering, vol. 3, nº 3, may 1970, p. 17-19.
25. LOBO B. CARNEIRO, F.L. Dosagem de Concretos, Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio, Instituto Nacional de Tecnologia, 2.^a edição, Rio de Janeiro, 1953.
26. MAFRA, D.Y. Técnicas e Medidas Nucleares, Editora Edgar Blücher Ltda./Editora da Universidade de São Paulo, 1.^a edição, 1973.
27. MARCEL, M.M. Detecção de Anomalias por Amostragem Sônica - Orientação das Decisões a Tomar, Centre Experimental de Recherches et D'Etudes du Batiment et des Travaux Publics, Paris, 1979, Tradução (CONCREMAT).
28. McDOUGALL, F.H. "Design Studies for Optimization of Gamma-Ray Backscatter Density Gauges", National Cooperative Highway Research Program Report 125, Appendix B. Highway Research Board, EUA, 1971.
29. MOON, M.R. "A Test Method for the Structural Integrity of Bored Piles", Civil Engineering and Public Works Review, may 1972, p. 476-480.
30. NUCLEAR-CHICAGO CORPORATION. Preliminary Instruction Manual of the Model 5920 d/M - Gauge Scaler, Nuclear-Chicago Corporation, Illinois, EUA, Publication ~~77~~ 713810, 1966.

31. OLDENBERG, O. e RASMUSSEN, N.C. Modern Physics for Engineers, McGraw-Hill Book Company, 1966.
32. ONO, H. e MACHIDA, T. "Errors of the Gamma-Scattering Density Meter and its design for Low-Density Measurement", Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw (18-22 october 1965). IAEA, Vienna, 1966, vol. 2, p. 369-381.
33. PAULING, L. Química Geral, Editora Ao Livro Técnico S.A., 1.^a edição, 1966. Tradução da 2.^a edição por W.H. Freeman and Company, em inglês, 1953.
34. PHILIPS. Electron Tubes, Part 6 - Data Handbook, january 1977.
35. PICCOLI, G.M. Aplicação da Sondagem Sônica em Fundações, Concremat - Engenharia e Tecnologia S.A., Rio de Janeiro, 1978.
36. PINTO, O.A. "Fundações: Problemas - Concretagens", Anais do Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia - Rio, 11/02/81. Impressão: Franki Fundações e Infra-estruturas.
37. PLATA BEDMAR, A. Isótopos en Hidrologia, Editorial Alhambra S.A., 1.^a edição, 1972.
38. PREISS, K. "Measuring Concrete Density by Gamma Ray Transmission", Materials Research and Standards, vol. 5, nº 6, p. 285-291, june 1965.

39. PREISS, K. "Analysis and Improved Design of Gamma-Ray Backscattering Density Gauges", Highway Research Board Record n° 107, p. 1-12, 1966.
40. _____. "Relation Between the Energy of Radiation and the Influence of Soil Composition in Radioisotope Methods of Water-Content and Density Measurement", Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 345-347, Haifa, 1967.
41. _____. "Checking of Cast-in-place Concrete Piles by Nuclear Radiation Methods", British Journal of Non-Destructive Testing, vol. 13, n° 3, p. 70-76, may 1971.
42. PREISS, K, e CAISERMAN, A. "Non-destructive Integrity Testing of Bored Piles by Gamma Ray Scattering", Ground Engineering, vol. 8, n° 3, p. 44-46, may 1975.
43. PREISS, K.; WEBER, H e CAISERMAN, A. "Integrity Testing of Bored Piles and Diaphragm Walls", The Civil Engineer in South Africa, vol. 20, n° 8, p. 191-196, august 1978.
44. PRUDÊNCID, W.J. Ensaios Não Destrutivos em Paredes Diafragma por Sondagem Sônica - Metrô do Rio de Janeiro, Concremat . Engenharia e Tecnologia S.A., Rio de Janeiro, 1978.
45. _____. Sondagem Sônica - Ensaio Não Destrutivo em Fundação Submersa, Concremat - Engenharia e Tecnologia S.A., Rio de Janeiro, 1978.
46. REESE, L.C. "Design and Construction of Drilled Shafts", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 104, n° GT1, p. 95-116, january 1978.

47. RESNICK, R. e HALLIDAY, D. Física, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., vol. I-1, 1.^a edição - reimpressão 1977. Tradução da edição americana de 1966.
48. SIMONS, N.E. e MENZIES, B.K. Introdução à Engenharia de Fundações, Editora Interciência Ltda., 1.^a edição, 1981. Tradução da edição inglesa de 1977 por Butterworth and Company (Publishers) Limited.
49. SPIEGEL, M.R. Estatística, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda./MEC, 1.^a edição - 7.^a reimpressão 1974. Tradução da edição americana de 1961 por Schaum Publishing Co.
50. STAIN, R.T. "Integrity Testing", Civil Engineering, april 1982, p. 53-59.
51. _____. "Integrity Testing", Civil Engineering, may 1982, p. 71-73.
52. STEINBACH, J. e VEY, E. "Caisson Evaluation by Stress Wave Propagation Method", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 101, nº GT4, p. 361-378, april 1975.
53. TERZAGHI, K. e PECK, R.B. Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia, Editora Ao Livro Técnico S.A., 1962 (Tradução da 1.^a edição em inglês por John Wiley and Sons, Inc., 1948).
54. THORBURN, S. e THORBURN, J.O. "Review of Problems Associated with the Construction of Cast-in-place Concrete Piles", DOE and CIRIA Piling Development Group, Report PG2. January 1977.

55. TOBID, J.M. Ensayos No Destructivos - Métodos Aplicables a la Construcción, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, febrero 1967.
56. TROXLER LABORATORIES, Depth Density Gauges - Instruction Manual, Troxler Electronic Laboratories, Inc., EUA, 1974.
57. _____. 3400 Series Instruction Manual: Surface Moisture - Density Gauges, Troxler Electronic Laboratories, Inc., EUA, Second Edition, february 1977.
58. VOLD, R.C. e HOPE, B.R. "Ultrasonic Testing of Deep Concrete Foundations", British Journal of Non-Destructive Testing, september 1978, p. 232-241.
59. WELTMAN, A.J. "Integrity Testing of Piles: a Review", DOE and CIRIA Piling Development Group, Report PG4. September 1977.
60. WHITAKER, T. "Structural Integrity of Piles", Civil Engineering, vol. 44, nº 6, june 1974, p. 20-23.